

Gestaltungskonzept für Augmented Reality unterstütztes Training an manuellen Montagearbeitsplätzen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

M. Sc. Stefan Werrlich

geboren am 13.08.1989 in Merseburg/Deutschland

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Gunther Notni
2. Gutachter: Prof. Dr. Dr. habil. Carsten Röcker
3. Gutachter: Prof. Dr. phil. Marc Oliver Korn

Tag der Einreichung: 05.03.2019

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 16.12.2019

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2019000492

Vorwort

Das Thema der vorliegenden Dissertation wurde von der Fakultät Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau am 16.02.2016 angenommen. Die Bearbeitung erfolgte im Zuge meiner Industrie-Promotion bei der BMW Group am Standort München. Über den Zeitraum der Entstehung dieser Arbeit haben mich zahlreiche Menschen begleitet, denen ich an dieser Stelle aufrichtig danken möchte.

Zunächst danke ich meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Gunther Notni, für die herausragende Betreuung der Arbeit. Das stets konstruktive, wertschätzende und wegweisende Feedback sowie die Diskussionsrunden im Rahmen der verschiedenen Doktorandenkolloquien haben mir dabei geholfen, unüberwindbar scheinende Hürden zu nehmen und die Arbeit sukzessive zu formen.

Meinen Vorgesetzten, den Herren Dr. Till Werneck und Dr. Kai Nitsche, die mich über die gesamte Zeit der Promotion begleitet haben, danke ich dafür, dass sie mir die Möglichkeit, den Freiraum und die notwendige Unterstützung gegeben haben, um an diesem spannenden, zukunftsweisenden Thema umfassend forschen zu können. Ihr uneingeschränktes Vertrauen, ihre Offenheit und Wertschätzung werden mir immer in Erinnerung bleiben und sind mir ein Vorbild.

Ich bedanke mich bei meinen Arbeitskolleg(inn)en Alexandra Ginger, Phuc-Anh Nguyen, Austino Davis Daniel und Carlos Emilio Franco Yañez für die angenehme, leidenschaftliche und außerordentlich kreative Zusammenarbeit, die maßgeblich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen hat. Darüber hinaus danke ich Tim Schleicher für die zahlreichen Diskussionen, die stets konstruktive Kritik und die guten Ratschläge, wenn ich an der einen oder anderen Stelle nicht mehr weiterwusste. Mein Dank gilt auch den vielen Probanden, die an den zahlreichen Experimenten dieser Arbeit teilgenommen haben. Ihre Begeisterung und ihr Erstaunen, wozu die AR-Technologie in der Lage ist, haben mir emotionale Augenblicke beschert, die ich nie vergessen werde. Der Moment, als die erste unerfahrene Person einen Motor lediglich mit Hilfe der selbst entwickelten HMD-basierten Trainingssoftware montierte sowie diese im Anschluss fehlerfrei und ohne Unterstützung wiederholte, war überwältigend und wird mir für immer in Erinnerung bleiben.

Mein Dank gilt auch Roswitha, die sich der Mammutaufgabe angenommen hat, die gesamte Dissertation Korrektur zu lesen. Meiner Lebensgefährtin Terry-Ann danke ich für ihr Verständnis und ihre Rücksicht, die sie mir insbesondere zum Schluss dieser Promotion entgegen gebracht hat. Ihre Unterstützung und aufbauenden, motivierenden Worte haben mich gestärkt, die Dissertation fertig zu stellen.

Der letzte und größte Dank gebührt meiner gesamten Familie, insbesondere meiner Mutter Heike Werrlich. Ihre bedingungslose Unterstützung war es letztendlich, die mir geholfen hat, das anspruchsvolle Maschinenbaustudium an der Technischen Universität Ilmenau erfolgreich abzuschließen, um mich der spannenden Herausforderung einer Promotion zu stellen. Ihr widme ich die vorliegende Dissertation mit großer Dankbarkeit.

München, 01.03.2019

Zusammenfassung

Forschungsvorhaben – Die Komplexitätssteigerung manueller Montageprozesse erfordert hochqualifizierte Arbeitskräfte, um die diffizilen Prozesse zu beherrschen. Um eine effektive und effiziente Ausbildung dieser Personen sicherzustellen, wird der Einsatz AR-basierter Trainingssysteme zunehmend relevant für die Industrie. Momentan mangelt es allerdings an wissenschaftlichen Untersuchungen im industriellen Nutzungskontext. Aufgrund dessen fehlen notwendige Erkenntnisse zur Gestaltung und Evaluation dieser Assistenzsysteme. Dem Ziel, diese Limitation zu schließen, widmet sich die vorliegende Dissertation.

Forschungsrahmen – Das Vorgehen zur Erarbeitung der genannten Zielsetzung orientiert sich an der gestaltungsorientierten Forschung. Dieses Paradigma forciert die iterative Gestaltung von problemlösungsorientierten Artefakten mit Hilfe einer stringenten Anwendung wissenschaftlicher Methoden.

Forschungsergebnisse – Durch Anwendung des zuvor erwähnten Forschungsparadigmas werden drei Artefakte gestaltet. Die Grundlage dafür liefern die Ergebnisse einer umfangreichen strukturierten Literaturrecherche und die Analyse domänenspezifischer Anforderungen. Basierend auf diesen wird zunächst ein menschenzentriertes Vorgehensmodell zur Analyse, Gestaltung und Evaluation von AR-basierten Trainingssystemen im industriellen Nutzungskontext erarbeitet (Artefakt 1), welches seine reproduzierbare Verwendbarkeit durch ausgewählte Methoden und Empfehlungen in allen Ablaufphasen sicherstellt. Darauf aufbauend wird eine HMD-basierte Trainingssoftware instanziiert (Artefakt 2) und durch geeignete Evaluation systematisch zu einer gebrauchstauglichen Anwendung weiterentwickelt. Diese wird einem abschließenden Test unterzogen und im Vergleich zu zwei etablierten Trainingskonzepten empirisch erprobt. Die daraus resultierenden Ergebnisse verdeutlichen sowohl die Nützlichkeit des Vorgehensmodells als auch die Gebrauchstauglichkeit des innovativen Trainingssystems. Beruhend auf den zahlreichen Erfahrungen und Erkenntnissen dieser Dissertation, werden abschließende Empfehlungen (Artefakt 3) dargelegt, welche die erfolgreiche Durchführung ähnlicher wissenschaftlicher Arbeiten sicherstellen.

Einschränkungen – Die umfangreichen multimodalen Funktionalitäten der Trainingssoftware wurden für eine konkrete prozedurale Montagetätigkeit entwickelt und am Beispiel eines industriellen Referenzarbeitsplatzes mit potentiellen Anwendern erprobt. Eine Anpassung der Software auf weitere Anwendungsfälle ist aufgrund des immensen Programmieraufwands sehr zeitaufwändig. Dadurch ist die Skalierbarkeit der Software stark limitiert. Angehende Forschungsprojekte sollten daher den Einsatz von Autorenwerkzeugen untersuchen, um eine effiziente Content-Erstellung zu gewährleisten. Darüber hinaus wurden keine Einflüsse der AR-Technologie auf das Langzeitgedächtnis erforscht. Diese Limitation eröffnet ein weiteres interessantes Forschungsfeld für zukünftige Untersuchungen.

Implikationen – Diese Dissertation liefert sowohl wissenschaftliche als auch praxisbezogene Implikationen. Demnach schließen die Erkenntnisse zur Gestaltung und Evaluation AR-basierter Trainingssysteme bestehende Forschungslücken und gewährleisten eine reproduzierbare Instanzierung weiterer solcher Assistenzsysteme. Eine gebrauchstaugliche HMD-basierte Trainingssoftware bietet Industrieunternehmen mit manuellen Montageprozessen zudem Einsparungspotentiale durch eine vollkommen neuartige und hocheffektive Ausbildungsmöglichkeit.

Abstract

Purpose – The growing complexity of manual assembly processes require highly skilled workers to deal with such challenging tasks. Therefore, AR-based learning systems become more and more interesting for the industry promising to ensure effective and efficient learning processes. However, scientific research in the field of AR-based learning, especially in the industrial domain, is still very limited. For this reason, necessary knowledge for the design and evaluation of such assistive systems is lacking. This dissertation aims to close these limitations.

Approach – The framework of the current scientific work is based on design science research (DSR). This research paradigm attempts to solve practical problems by developing purpose-oriented artifacts with rigorous scientific methods.

Findings – Three artifacts are designed using the DSR technique. Hereof, the results of a comprehensive literature survey and an analysis of domain specific requirements provide the foundation. Based on this, a human-centered framework for analyzing, designing and evaluating AR-based learning systems in the industrial context is elaborated (artifact 1). Through well-chosen methods and recommendations in all three phases, a reproducible approach can be guaranteed. By applying this framework, a HMD-based learning software (artifact 2) is developed through several iterative evaluations with potential users using the example of a real internal combustion engine assembly task in order to ensure a high usability. Finally, the software is compared to two traditional approaches (paper-based and trainer-based learning). The results validate the utility of the framework as well as that of the innovative HMD-based learning approach. Based on numerous findings and empirical knowledge, several recommendations are derived to conclude this dissertation and facilitate forthcoming research.

Limitations – The elaborate multimodal functionalities of the training software are developed and systematically improved using a concrete procedural internal combustion engine assembly task. This leads to a tremendous and time consuming programming effort as soon as individual software adjustments or assignments are requested by the industrial domain. Therefore, the software scalability is very limited. Due to the previously mentioned limitation, future research should concentrate its investigation into developing authoring tools which enable an efficient AR content creation. Furthermore, the impact of AR on the short-term memory is only analyzed in this dissertation which opens up an additional interesting research area for future explorations.

Implications – This current thesis provides scientific as well as practical oriented implications. The results regarding the design and evaluation of AR-based learning systems ensure a reproducible scientific procedure to instantiate these assistive systems further. In addition, initial insights regarding the use of these systems in the industrial domain are presented, therefore closing current research gaps. A HMD-based learning software offers the opportunity for companies with manual assembly tasks to conserve money due to a completely new and highly-effective training possibility.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Zusammenfassung.....	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen.....	2
1.3 Aufbau der Dissertation	5
2 Forschungsrahmen.....	7
2.1 Grundlagen gestaltungsorientierter Forschung	7
2.2 Einordnung der Forschungsziele	10
2.3 Darlegung des Forschungsvorgehens	11
2.4 Zusammenfassung des Kapitels	13
3 Stand-der-Technik.....	14
3.1 Einordnung und Abgrenzung des Forschungsfeldes.....	14
3.2 Strukturierte Aufarbeitung der Wissensbasis	19
3.3 Darlegung der finalen Datenbasis.....	23
3.3.1 Vorgehensmodelle zur Entwicklung AR-basierter Trainingssysteme.....	23
3.3.2 Gestaltungsempfehlungen für AR-basierte Trainingssysteme.....	26
3.3.3 Evaluationen von AR-basierten Trainingssystemen	30
3.3.4 Zusammenfassung der finalen Datenbasis	38
3.4 Anforderungen der Anwendungsdomäne	39
3.4.1 Versuchsdesign.....	39
3.4.2 Versuchsteilnehmer	39
3.4.3 Versuchsablauf	39
3.4.4 Ergebnisse der Fokusgruppen-Diskussion	40
3.4.5 Diskussion der Ergebnisse.....	42
3.5 Zusammenfassung des Kapitels	43

4	Erarbeitung des Vorgehensmodells	45
4.1	Menschenzentrierte Gestaltung.....	45
4.2	Nutzungskontext- & Anforderungsanalyse.....	47
4.2.1	Dokumentenanalyse	47
4.2.2	Aufgabenanalyse.....	48
4.2.3	Beobachtung.....	48
4.2.4	Interview und Fragebogen.....	49
4.2.5	Explikation der Analysemethodik.....	50
4.3	Gestaltung	52
4.3.1	Microsoft HoloLens	54
4.3.2	Inside-Out Tracking.....	55
4.3.3	Grundsätze der Dialoggestaltung	56
4.3.4	Visualisierung von augmentierten Informationen	57
4.3.5	Gamification in der manuellen Montage.....	59
4.3.6	Gestaltung einer natürlichen Benutzerschnittstelle.....	60
4.3.7	Zusammenfassung der Gestaltungshinweise.....	62
4.4	Evaluation.....	63
4.4.1	Formative Evaluation.....	64
4.4.2	Summative Evaluationsphase	67
4.4.3	Explikation der Evaluationsmethodik	67
4.5	Zusammenfassung des Kapitels	71
5	Anwendung des Vorgehensmodells.....	74
5.1	Nutzungskontext- & Anforderungsanalyse.....	74
5.1.1	Versuchsdesign.....	74
5.1.2	Versuchsablauf	75
5.1.3	Versuchsteilnehmer	76
5.1.4	Ergebnisse der Nutzungskontextanalyse	76
5.1.5	Ergebnisse der Anforderungsanalyse	78
5.1.6	Ergebnisse der Aufgabenanalyse.....	80
5.1.7	Diskussion der Ergebnisse.....	80
5.1.8	Zusammenfassung der Nutzungskontext- & Anforderungsanalyse.....	81
5.2	Gestaltung	82
5.2.1	Aufbau der Trainingssoftware	82
5.2.2	Gestaltung der Bedienoberfläche.....	83
5.2.3	Gestaltung der Gamification-Elemente	87
5.2.4	Gestaltung der Interaktionsmodalitäten.....	89
5.2.5	Gestaltung des Nutzerfeedbacks	90

5.2.6	Gestaltung des Inside-Out-Trackings	92
5.2.7	Zusammenfassung der Systemgestaltung.....	94
5.3	Erste Formative Evaluation	95
5.3.1	Aufbau der Versuchsumgebung.....	95
5.3.2	Versuchsdesign	96
5.3.3	Versuchsteilnehmer	97
5.3.4	Versuchsablauf	97
5.3.5	Ergebnisse	98
5.3.6	Diskussion der Ergebnisse.....	100
5.3.7	Zusammenfassung der ersten formativen Evaluation	101
5.4	Zweite Formative Evaluation	101
5.4.1	Versuchsdesign.....	101
5.4.2	Versuchsteilnehmer	102
5.4.3	Versuchsablauf	103
5.4.4	Ergebnisse	104
5.4.5	Diskussion der Ergebnisse.....	108
5.4.6	Zusammenfassung der zweiten formativen Evaluation.....	112
5.5	Dritte Formative Evaluation.....	112
5.5.1	Versuchsdesign.....	113
5.5.2	Versuchsteilnehmer	114
5.5.3	Versuchsablauf	114
5.5.4	Ergebnisse	115
5.5.5	Diskussion der Ergebnisse.....	118
5.5.6	Zusammenfassung der dritten formativen Evaluation	119
5.6	Summative Evaluation.....	120
5.6.1	Versuchsdesign.....	121
5.6.2	Versuchsteilnehmer	123
5.6.3	Versuchsablauf	123
5.6.4	Ergebnisse	125
5.6.5	Diskussion der Ergebnisse.....	132
5.6.6	Zusammenfassung der summativen Evaluation	135
5.7	Empfehlungen	137
5.7.1	Allgemeine Empfehlungen.....	137
5.7.2	Methodische Empfehlungen	138
5.7.3	Gestaltungsempfehlungen.....	139
5.8	Zusammenfassung des Kapitels	141

6	Zusammenfassung und Ausblick	143
6.1	Zusammenfassung des wissenschaftlichen Beitrags	143
6.2	Zusammenfassung des praxisbezogenen Beitrags	144
6.3	Weiterer Forschungsbedarf	145
6.4	Ausblick	146
	Literaturverzeichnis	148
	Anhang	164
	Veröffentlichungen und Vorträge	177
	Erklärung gemäß Anlage 1 der Promotionsordnung	178

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zielsetzung der vorliegenden Dissertation.	3
Abbildung 2: Aufbau und Verlauf der vorliegenden Dissertation.	5
Abbildung 3: Einordnung der Artefakte in die gestaltungsorientierte Forschung.	8
Abbildung 4: Vorgehensmodell der gestaltungsorientierten Forschung.	9
Abbildung 5: Richtlinien der gestaltungsorientierten Forschung nach Hevner.	9
Abbildung 6: Verortung der Artefakte innerhalb der gestaltungsorientierten Forschung.	11
Abbildung 7: Einordnung der Dissertation in die gestaltungsorientierte Forschung.	12
Abbildung 8: Verortung der Forschungsfragen in das Vorgehensmodell von Vaishnavi und Küchler.	13
Abbildung 9: Das Virtuality Continuum (VC) nach Milgram.	15
Abbildung 10: Einordnung der Dissertation in das Forschungsfeld.	17
Abbildung 11: Vorgehensmodell zur strukturierten Aufarbeitung der Literatur.	20
Abbildung 12: Vorgehensmodell zur Gestaltung und Evaluation von VR-Systemen.	24
Abbildung 13: Vorgehen zur Entwicklung von AR-basierten Montageassistenzsystemen.	25
Abbildung 14: Gestaltungsempfehlungen für AR-basierte Trainingssysteme.	27
Abbildung 15: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme.	46
Abbildung 16: Vorgehen zur Analyse des Nutzungskontexts und der Nutzeranforderungen.	52
Abbildung 17: Gestaltungselemente der HoloLens basierten Trainingsanwendung.	53
Abbildung 18: Microsoft HoloLens.	54
Abbildung 19: Gestaltungseinflüsse auf die HoloLens-basierte Trainingssoftware.	63
Abbildung 20: Einordnung des SUS Werts in verschiedene Bewertungsskalen.	66
Abbildung 21: Formative und Summative Evaluation der HMD-basierten Trainingsanwendung.	70
Abbildung 22: Vorgehensmodell zur Gestaltung AR-basierter Montagetrainingssysteme.	73
Abbildung 23: Zusammenfassende Erkenntnisse der Aufgabenanalyse.	80
Abbildung 24: Programmablaufplan der Trainingssoftware.	83
Abbildung 25: Bedienoberfläche der HMD-basierten Trainingssoftware.	84
Abbildung 26: Bedienoberfläche der verschiedenen Level der Trainingssoftware.	86
Abbildung 27: Gamification-Konzept der HMD-basierten Trainingsanwendung.	88
Abbildung 28: Quizfrage während des Montagetrainings.	89
Abbildung 29: Interaktionskonzept der HMD-basierten Trainingsanwendung.	90
Abbildung 30: Augmented Reality Tunnel als Unterstützung zur Bauteil- & Werkzeugentnahme.	91
Abbildung 31: Funktionsweise der BoxCollider-Kollision.	92
Abbildung 32: Konzept und Umsetzung des Natural-Feature Trackings.	93

Abbildung 33: Verwendung der HMD-basierten Trainingsanwendung als Montageunterstützung.	94
Abbildung 34: Aufbau der Versuchsumgebung.	96
Abbildung 35: SUS- Erste formative Evaluation.	98
Abbildung 36: Ergebnis des AttrakDiffs– erste formative Evaluation.	99
Abbildung 37: Optimierung der virtuellen Bedienoberfläche nach der ersten Evaluation.....	100
Abbildung 38: SUS- Zweite formative Evaluation.....	106
Abbildung 39: Ergebnis des AttrakDiffs– zweite formative Evaluation.	107
Abbildung 40: Sicht eines Benutzers während der Absolvierung des zusätzlichen Levels.	110
Abbildung 41: Optimierung der virtuellen Bedienoberfläche nach der zweiten formativen Evaluation..	111
Abbildung 42: SUS- dritte formative Evaluation.....	117
Abbildung 43: Konzept der Papieranleitungen für die verschiedenen Montagedurchgänge.	120
Abbildung 44: Anlernkonzept des Trainer-basierten Montagetrainings.	121
Abbildung 45: Ergebnis der verschiedenen Items des UEQs.	130

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eignung AR-basierter Ausgabegeräte für manuelle Montagetätigkeiten.	19
Tabelle 2: Datengrundlage incl. aller Dopplungen.....	21
Tabelle 3: Domänenspezifische Kategorisierung der Datenbasis.....	22
Tabelle 4: Kategorisierte Datengrundlage D2.1 in A, B und C Literatur.....	22
Tabelle 5: Finale kategorisierte Datengrundlage (D2.2) der vorliegenden Dissertation.....	23
Tabelle 6: Allgemeine Empfehlungen für industrielle AR-Systeme.	27
Tabelle 7: Vergleich zwischen AR- und VR-basiertem Training.....	32
Tabelle 8: Vergleich zwischen AR- und Papier-basiertem Lernen.	33
Tabelle 9: Auswertung der Evaluationen AR-basierter Trainingssysteme.	35
Tabelle 10: Forschungslücken und abgeleitete Bedarfe aus der Wissenschaft.....	38
Tabelle 11: Anforderungen der Anwendungsdomäne.....	40
Tabelle 12: Grundsätze der menschenzentrierten Gestaltung.....	46
Tabelle 13: Vergleich verschiedener Methoden zur Kontext- und Anforderungsanalyse.....	50
Tabelle 14: Gestaltungsempfehlungen AR-Benutzerschnittstellen.	62
Tabelle 15: Methoden zur Evaluation von HMD-basierten Trainingsanwendungen.....	68
Tabelle 16: Erkenntnisse der Nutzungskontextanalyse.....	77
Tabelle 17: Fragen zur Erhebung der Benutzeranforderungen.....	78
Tabelle 18: Zusammenfassung der Nutzeraussagen.....	78
Tabelle 19: Funktionale und nicht-funktionale Gestaltungsanforderungen.	79
Tabelle 20: Deskriptive Statistik der Effizienzmessgrößen– zweite formative Evaluation.....	104
Tabelle 21: Deskriptive Statistik der Effektivitätsmessgrößen– zweite formative Evaluation.....	105
Tabelle 22: Deskriptive Statistik der SUS– zweite formative Evaluation.....	105
Tabelle 23: Deskriptive Statistik des NASA-TLX– zweite formative Evaluation.	107
Tabelle 24: Deskriptive Statistik der Effizienzmessgrößen– dritte formative Evaluation.	115
Tabelle 25: Deskriptive Statistik der Effektivitätsmessgrößen– dritte formative Evaluation.	116
Tabelle 26: Deskriptive Statistik der SUS– dritte formative Evaluation.	116
Tabelle 27: Deskriptive Statistik des NASA-TLX– dritte formative Evaluation.....	117
Tabelle 28: Deskriptive Statistik der Effizienzmessgrößen– summative Evaluation.	125
Tabelle 29: Ergebnis des Dunn-Bonferroni-Tests der signifikanten Effizienzmessgrößen.....	126
Tabelle 30: Deskriptive Statistik der Effektivitätsmessgrößen– summative Evaluation.....	127
Tabelle 31: Ergebnis des Dunn-Bonferroni-Tests der signifikanten Effektivitätsmessgrößen.....	127
Tabelle 32: Deskriptive Statistik des NASA-TLX– summative Evaluation.....	128

Tabelle 33: Ergebnis des Dunn-Bonferroni-Tests der signifikanten Subskalen des NASA-TLX.	129
Tabelle 34: Deskriptive Statistik der Messgrößen PQ und HQ- summative Evaluation.	129
Tabelle 35: Ergebnis des Dunn-Bonferroni-Tests für die Messgröße HQ.	129
Tabelle 36: Deskriptive Statistik der verschiedenen Items des UEQs.	130
Tabelle 37: Ergebnis des Dunn-Bonferroni-Tests für die signifikanten Items des UEQs.	131

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
AP	Arbeitsplatz
AR	Augmented Reality
AV	Augmented Virtuality
DOF	Degrees of Freedom
DSR	Design Science Research (gestaltungsorientierte Forschung)
EMG	Elektromyografie
FA	Funktionale Anforderung
FOV	Field of View
GUI	Graphical User Interface
HMD	Head-Mounted Display
HQ	Hedonische Qualität
IMU	Inertial Measurement Unit
IPD	Interpupillardistanz
MR	Mixed Reality
NASA-TLX	NASA Task Load Index
NFA	Nicht-Funktionale Anforderung
NUI	Natural User Interface
OST-HMD	Optical-See-Through Head-Mounted Display
PQ	Pragmatische Qualität
SAB	Standardarbeitsblatt
SDK	Software Development Kit
SUS	System Usability Scale
TBCA	Theme-based Content Analysis
UEQ	User Experience Questionnaire
UI	User Interface
UX	User Experience
VC	Virtuality Continuum
VR	Virtual Reality
VST-HMD	Video-See Through Head-Mounted Display
ZK	Zylinderkopf

1 Einleitung

„Das Problem zu erkennen ist wichtiger als die Lösung zu erkennen, denn die genaue Darstellung des Problems führt zur Lösung.“

Albert Einstein, Physiker

1.1 Motivation und Problemstellung

Produktindividualisierung ist eines der Kernelemente heutiger Unternehmensstrategien, denn mit Hilfe von personalisierten Produkten versprechen sich Firmen einen Wettbewerbsvorteil und stärkere Kundenbindung [1]. Die zunehmende Individualisierung der Produkte führt zu einer Komplexitätssteigerung der Fertigungsprozesse. Insbesondere manuelle Montageprozesse werden flexibel gestaltet, um eine hohe Variantenvielfalt realisieren zu können [2]. Die größte Herausforderung bei der Realisierung solch flexibler Montageprozesse besteht in der Ausbildung neuer Montagemitarbeiter, da diese verschiedenste variantenspezifische Montageprozesse beherrschen müssen [3].

Die traditionelle Ausbildung erfolgt meist direkt in einer taktgebundenen Produktionslinie (on-the-job). Dabei lernt ein erfahrener Mitarbeiter (Trainer) einen neuen, unerfahrenen Mitarbeiter (Trainee) während der laufenden Produktion an [4]. Zur Durchführung dieser Trainingsmethode muss ein Trainer verfügbar und permanent anwesend sein, wodurch hohe Personalkosten entstehen können. Darüber hinaus ist diese Art des Anlernens stressig für den Trainee, da die vorgegebene Taktzeit während des Anlernens oft nicht eingehalten wird [5]. Dies kann zu Störungen im Produktionsablauf führen. Des Weiteren birgt diese Anlernmethode ein erhöhtes Fehlerrisiko, da neue Mitarbeiter noch unerfahren sind. Um dieses zu reduzieren, werden verschiedene unterstützende Medien ergänzend zum Training on-the-job eingesetzt. Ein häufig verwendetes Medium ist die klassische Papieranleitung. Darin sind spezifische Textinformationen und kontextbezogene Bilder der zu erlernenden Montageprozedur enthalten. Neben der Papieranleitung werden häufig auch Videos genutzt, um Montageprozesse zu vermitteln. Diese Arten der Wissensvermittlung sind allerdings sehr theoretisch. Dadurch besteht die Gefahr, dass das gelernte theoretische Wissen schwer auf die reale Montageaufgabe übertragbar ist. Alternativen wie Computer gestützte Assistenzsysteme, insbesondere Augmented Reality (AR) Technologien, erlangen dadurch zunehmend an Bedeutung.

Der Begriff der erweiterten Realität (engl. Augmented Reality) wurde 1997 durch Azuma [6] definiert und charakterisiert sich durch drei wesentliche Eigenschaften. Die erweiterte Realität vereint die reale mit der virtuellen Welt und ermöglicht die Darstellung sowie die Echtzeit-Interaktion mit virtuellen Objekten im dreidimensionalen realen Raum. Die Visualisierung dieser virtuellen Inhalte kann dabei durch Smartphones bzw. Tablets (Hand-held Devices), durch Projektionen oder mit Hilfe von Head-Mounted Displays (HMD) erfolgen [7]. Durch die Bereitstellung von kontextbezogenen virtuellen Informationen kann die Qualität und Effizienz von prozeduralen Tätigkeiten verbessert werden, was bereits durch zahlreiche Untersuchungen nachgewiesen wurde [8–10]. Eine reine Schritt-für-Schritt Anweisung ist allerdings unzureichend, wenn ein Assistenzsystem als Lernunterstützung genutzt werden soll. Aufgrund der starken Anleitung (engl. Guidance) durch die augmentierten Informationen besteht eine große Gefahr, dass Benutzer eine Abhän-

gigkeit entwickeln und bei wiederholter Ausführung der erlernten Tätigkeit, ohne unterstützendes Assistenzsystem, diese nicht ausführen können. Demzufolge fordern Webel et al. [11] eine klare Unterscheidung zwischen Trainingssystemen und Unterstützungs- bzw. Leitsystemen. Ein Trainingssystem muss so gestaltet werden, dass es die zugrundeliegenden sensomotorischen und kognitiven Fähigkeiten des Benutzers trainiert, anstatt diesen lediglich durch eine bestimmte Anzahl von Montageschritten zu leiten. In einigen wissenschaftlichen Untersuchungen konnte das Potential von AR-basierten Trainingssystemen bereits erfolgreich nachgewiesen werden [12; 13]. Demnach kann durch die Bereitstellung von multimodalen augmentierten Informationen der Wissenstransfer gegenüber konventionellen Anlernmethoden gesteigert werden. Trotz dieser positiven Ergebnisse mangelt es noch immer an Erkenntnissen und dem Einsatz von AR-basierten Trainingssystemen im industriellen Nutzungskontext, was durch aktuelle wissenschaftliche Publikationen bestätigt wird.

Senderek et al. [14] führen den fehlenden Einsatz speziell von HMD-basierten Trainingsanwendungen auf mangelnde didaktische Konzepte zurück. Weitere Wissenschaftler bemängeln die Existenz von Gestaltungsrichtlinien für AR-basierte Trainingssysteme [15–17]. Darüber hinaus werden potentielle Nutzer bei der Entwicklung und Gestaltung AR-basierter Trainingssysteme oft ausgeschlossen, wodurch ein mangelndes Nutzerverständnis entsteht [18]. Folglich fehlt es an Anforderungen, welche die individuellen Bedürfnisse der Benutzer bei der Gestaltung berücksichtigen [19]. Schlussfolgernd besteht somit der Bedarf einer menschenzentrierten Vorgehensweise (engl. user-centered design) zur Gestaltung und Entwicklung von effektiven, effizienten und zufriedenstellenden AR-basierten Trainingssystemen. Diese Eigenschaften lassen sich unter dem Überbegriff der Gebrauchstauglichkeit zusammenfassen und sind in der DIN EN ISO 9241-210:2010 definiert [20]. Die Gebrauchstauglichkeit definiert sich als: „Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um festgelegte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“.

- Die Effektivität definiert sich als „Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“.
- Unter dem Begriff Effizienz wird der „im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzte Aufwand definiert, mit dem Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“.
- Die Zufriedenstellung wird definiert als „Freiheit von Beeinträchtigungen und positive Einstellungen gegenüber der Nutzung des Produkts“.

Daher widmet sich diese Dissertation der Erarbeitung eines Gestaltungskonzepts für AR-basierte Trainingssysteme an manuellen Montagearbeitsplätzen. Dieses besteht aus einem Vorgehensmodell zur Gestaltung und Entwicklung von solchen Trainingssystemen, einem daraus instanziierten gebrauchstauglichen System und verschiedenen Gestaltungsempfehlungen.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Der forschungsmethodische Rahmen dieser Dissertation zur Erarbeitung des Gestaltungskonzepts orientiert sich dabei an der gestaltungsorientierten Forschung (engl. Design Science Research – DSR). Hierzu

wird zunächst ein Vorgehensmodell entwickelt, welches bestehende theoretische Grundlagen und domänenspezifische Anforderungen berücksichtigt. Dieses Vorgehensmodell orientiert sich dabei an der menschenzentrierten Entwicklung (DIN EN ISO 9241-210:2010) und liefert konkrete methodische Empfehlungen und spezifische Hinweise zur Gestaltung und Entwicklung von gebrauchstauglichen, industriellen AR-basierten Trainingssystemen für manuelle Montagearbeitsplätze. Durch die Anwendung des Vorgehensmodells wird ein prototypisches AR-basiertes Trainingssystem instanziiert, das am Beispiel der Motormontage in der Automobilproduktion empirisch erprobt wird. Die Erprobung erfolgt dabei iterativ, wodurch das Trainingssystem und das Vorgehensmodell sukzessive optimiert werden. Die experimentellen Iterationsstufen erfolgen mit erfahrenen Montagearbeitern, jungen Auszubildenden sowie AR-Experten, welche die Gebrauchstauglichkeit des entwickelten Trainingssystems überprüfen. Während der Erprobung entsteht zum einen neues Wissen über die Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit des erarbeiteten Vorgehensmodells und zum anderen lassen sich Gestaltungsempfehlungen für AR-basierte Trainingssysteme für manuelle Montage Tätigkeiten im industriellen Nutzungskontext ableiten. Zusammengefasst ergeben die genannten Einzelziele das finale Gestaltungskonzept AR-basierter Trainingssysteme für manuelle Montagearbeitsplätze im industriellen Nutzungskontext. Die nachfolgende Abbildung 1 fasst diese schematisch zusammen.

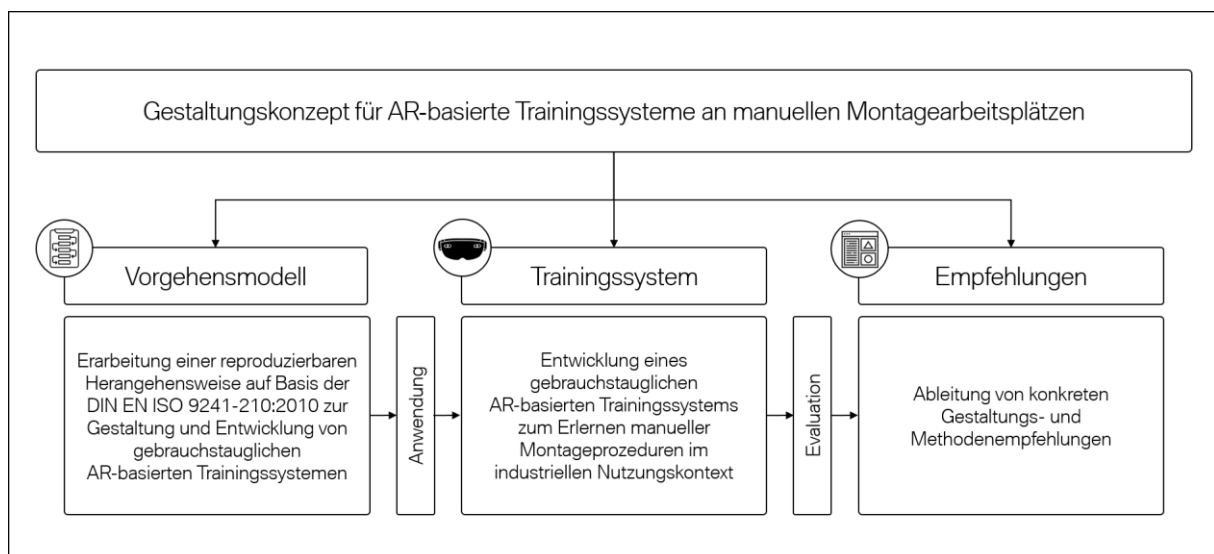


Abbildung 1: Zielsetzung der vorliegenden Dissertation.

Quelle: eigene Darstellung.

Im Rahmen dieser vorliegenden Dissertation werden nachfolgend vier aufeinander folgende Forschungsfragen formuliert, welche dazu dienen sollen, die zuvor genannten Einzelziele systematisch und wissenschaftlich zu erarbeiten.

I. Welche Anforderungen werden an die Gestaltung von gebrauchstauglichen AR-basierten Trainingssystemen in der manuellen Montage gestellt?

Für die Beantwortung der ersten Forschungsfrage wird zunächst eine strukturierte Literaturanalyse durchgeführt, wodurch Anforderungen an die Gestaltung und Entwicklung eines AR-basierten Trainingssystems erarbeitet werden. Zusätzlich werden die bestehenden wissenschaftlichen Erkenntnisse durch pra-

xisbezogene, domänenspezifische Anforderungen ergänzt. Diese praktischen Anforderungen zur Gestaltung eines AR-basierten Trainingssystems für manuelle Montagearbeitsplätze werden in enger Zusammenarbeit mit relevanten Personen in der Automobilindustrie erhoben. Sie bilden die Grundlage zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage.

II. Welche Methoden, Modelle und Theorien sollte ein Vorgehensmodell zur Gestaltung gebrauchstauglicher industrieller AR-basierter Trainingssysteme enthalten?

Im zweiten Schritt werden bestehende Methoden, Modelle und Theorien zur Gestaltung von AR-basierten Trainingssystemen analysiert und auf Basis der erhobenen theoretischen sowie praxisbezogenen Anforderungen ausgewählt und zu einem Vorgehensmodell zusammengefasst. Dieses beinhaltet geeignete Methoden zur Analyse der Anwendungsdomäne und zur Evaluierung AR-basierter Trainingssysteme für manuelle Montagearbeitsplätze im industriellen Nutzungskontext. Darüber hinaus gibt das Vorgehensmodell neben den praxisbezogenen Anforderungen auch Auskunft über wissenschaftliche Modelle und Theorien zur Gestaltung von AR-basierten Trainingssystemen. Diese bilden die Grundlage für die Instanziierung eines prototypischen Systems und zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage.

III. Wie muss ein AR-basiertes Trainingssystem für manuelle Montagearbeitsplätze gestaltet werden, sodass es von den Anwendern als gebrauchstauglich bewertet wird?

Durch die Erprobung des instanziierten Prototyps ergeben sich umfassende Erkenntnisse zur Gebrauchstauglichkeit des Systems und zur Nützlichkeit des erstellten Vorgehensmodells. Die empirische Erprobung des Trainingssystems wird am Beispiel der Motormontage in der Automobilproduktion durchgeführt. Die Evaluationen und Weiterentwicklungen erfolgen dabei stets iterativ und zielen darauf ab, ein gebrauchstaugliches System zu entwickeln. Dabei wird der Prototyp im Rahmen von Fallstudien durch die Zielgruppe bewertet und kontinuierlich weiterentwickelt. Komplettiert wird die Bewertung des Prototyps durch zusätzliche Evaluationen mit Nicht-Benutzern (z.B. Büroangestellte). Das finale gebrauchstaugliche System wird schließlich genutzt, um die vierte und letzte Forschungsfrage zu beantworten.

IV. Welche Zusammenhänge ergeben sich durch die praktische Anwendung des gebrauchstauglichen AR-basierten Trainingssystems im industriellen Nutzungskontext?

Die Nützlichkeit des gebrauchstauglichen AR-basierten Trainingssystems wird am Beispiel der Motormontage mit Benutzern erprobt und mit konventionellen Anlernmethoden verglichen. Im Fokus steht hierbei die Erfassung des transferierten Wissens, welches durch die verschiedenen unterstützenden Medien vermittelt wird. Diese Bewertung stellt den Abschluss der vorliegenden Arbeit dar und bietet Unternehmen die Grundlage zur Entscheidung, Optimierung und gegebenenfalls zur Substituierung ihrer herkömmlichen Trainingsmethoden durch AR-basiertes Montagetraining. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse durch die Evaluationen und Neugestaltungen des Systems, werden schließlich verschiedene Empfehlungen für die erfolgreiche Gestaltung AR-basierter Trainingssysteme an manuellen Montagearbeitsplätzen im industriellen Nutzungskontext abgeleitet.

Der **wissenschaftliche Beitrag** dieser Dissertation resultiert aus der Beantwortung der ersten zwei Forschungsfragen. Im Rahmen einer strukturierten Literaturrecherche werden wissenschaftliche Erkenntnisse für das Forschungsfeld dieser Arbeit systematisch und reproduzierbar erarbeitet und bestehende Forschungslücken aufgezeigt. Hiermit erhalten Wissenschaftler einen umfassenden Einblick in die relevanteste Literatur und weiterführende Forschungspotentiale. Zusätzlich dazu werden praxisbezogene Anforderungen der Anwendungsdomäne erhoben. Diese komplettieren die Erkenntnisse und Anforderungen aus der Literatur und liefern eine Antwort auf die erste Forschungsfrage. Darauf aufbauend wird ein Vorgehensmodell zur Gestaltung gebrauchstauglicher AR-basierter Trainingssysteme entwickelt. Durch dessen Anwendung wird die Nützlichkeit der einzelnen Methoden des Vorgehensmodells überprüft. Somit ergeben sich konkrete Methodenempfehlungen, welche eine reproduzierbare Anwendbarkeit des Vorgehensmodells gewährleisten und Wissenschaftlern die Möglichkeit geben, weitere gebrauchstaugliche Instanzierungen von AR-basierten Trainingssystemen für manuelle Montagetätigkeiten zu entwickeln.

Der **praxisbezogene Beitrag** dieser Arbeit ergibt sich aus der Beantwortung der dritten und vierten Forschungsfrage. Durch die Anwendung des Vorgehensmodells wird ein AR-basiertes Trainingssystem instanziiert, welches durch iterative Weiterentwicklungen zu einem gebrauchstauglichen System geformt wird. Dieses dient den Benutzern schließlich als Assistenzsystem zum Erlernen neuer Montageprozeduren. Durch empirische Systemerprobungen im industriellen Nutzungskontext werden wichtige Erkenntnisse zur Nützlichkeit solcher Systeme generiert. Daher liefert diese Dissertation einen entscheidenden Beitrag zum produktiven Einsatz von AR-basierten Trainingssystemen im industriellen Nutzungskontext.

1.3 Aufbau der Dissertation

Die vorliegende Dissertation gliedert sich in sechs aufeinander aufbauende Kapitel. Der schematische Aufbau sowie der Ablauf der Arbeit sind in der nachfolgenden Abbildung 2 dargestellt.

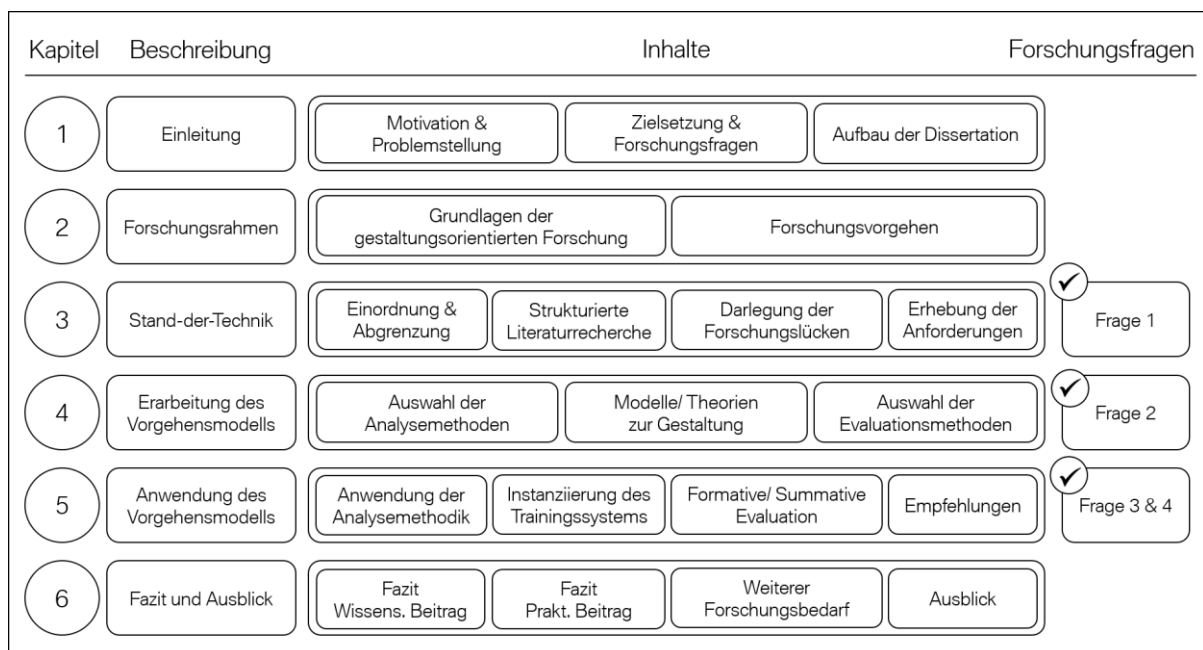


Abbildung 2: Aufbau und Verlauf der vorliegenden Dissertation.

Quelle: Eigene Darstellung.

Im ersten Kapitel wird die Motivation und Problemstellung dieser Arbeit dargelegt und begründet. Darauf aufbauend werden vier Forschungsfragen formuliert, welche im Laufe der Dissertation beantwortet werden. Darüber hinaus wird die wissenschaftliche sowie praktische Zielsetzung definiert und der Aufbau der Arbeit präsentiert.

Das zweite Kapitel widmet sich der Beschreibung des Forschungsrahmens. Hierfür werden zunächst die Grundlagen der gestaltungsorientierten Forschung erläutert. Darauf aufbauend werden die Forschungsziele in den Forschungsrahmen eingeordnet und das konkrete Forschungsvorgehen dargelegt.

Kapitel drei konzentriert sich auf die Erarbeitung der Stand-der-Technik. Zunächst erfolgt eine Einordnung und Abgrenzung des Forschungsfelds. Mit Hilfe einer strukturierten Literaturanalyse werden die relevantesten wissenschaftlichen Beiträge identifiziert. Durch deren Analyse ergeben sich relevante Forschungslücken, welche die Notwendigkeit dieser Dissertation begründen. Daraus resultieren schließlich Anforderungen der Wissenschaft. Ergänzend dazu werden die Bedarfe der Praxis ermittelt. Somit wird die erste Forschungsfrage beantwortet und die Grundlage für das nachfolgende Kapitel geschaffen.

Im vierten Kapitel wird auf Basis der Anforderungen aus der Literatur und der Praxis ein menschenzentriertes Vorgehen zur Gestaltung von AR-basierten Trainingssystemen an manuellen Montagearbeitsplätzen entwickelt. Dieses enthält konkrete Methoden zur Nutzungskontext- und Anforderungsanalyse. Darüber hinaus liefert das Vorgehensmodell gestaltungstheoretische Grundlagen für die Entwicklung von AR-basierten Trainingssystemen. Die Auswahl und Darlegung geeigneter Methoden zur Evaluierung komplettiert das Vorgehensmodell und bietet die Grundlage für die Instanziierung und Erprobung des Trainingssystems.

Im vorletzten Kapitel, dem **fünften Kapitel**, findet die praktische Anwendung des erarbeiteten Vorgehensmodells statt. Es wird zunächst ein ausgewählter Nutzungskontext analysiert und die Anforderungen potentieller Benutzer erhoben. Auf dieser Basis und den Empfehlungen des Vorgehensmodells wird das Trainingssystem instanziiert. Dieses wird in zwei aufeinanderfolgenden Phasen evaluiert. In der ersten Phase, der formativen Phase, wird das System durch verschiedene Benutzergruppen erprobt. Diese Erprobung erfolgt iterativ und zielt darauf ab, Schwachstellen im System zu detektieren und diese systematisch zu optimieren. Dadurch entsteht ein gebrauchstaugliches AR-basiertes Trainingssystem. Das finale System wird in der zweiten Phase, der summativen Phase, einem empirischen Vergleich unterzogen und mit konventionellen Trainingsmethoden verglichen (dem Papier- & dem Trainer-basierten Anlernen). Aus den Erkenntnissen der Evaluationen und der Anwendung der verschiedenen Methoden des Vorgehensmodells werden schließlich Empfehlungen abgeleitet. Im Zuge dessen werden die dritte und vierte Forschungsfrage beantwortet.

Im **sechsten Kapitel** werden die erarbeiteten wissenschaftlichen und praktischen Erkenntnisse zusammengefasst dargelegt. Dieses Kapitel bildet den Abschluss der vorliegenden Dissertation. Die Darlegung des weiteren Forschungsbedarfs rundet die Arbeit ab und gibt anderen Wissenschaftlern die Möglichkeit zur Anknüpfung an die vorliegende Arbeit.

2 Forschungsrahmen

“Science is about knowing, engineering is about doing.”

Henry Petroski, Professor und Autor

Der Forschungsrahmen einer wissenschaftlichen Arbeit charakterisiert sich durch seine methodische Vorgehensweise. „Die einzelnen Phasen des Forschungsprozesses, ihre Reihenfolge und Ausgestaltung müssen dabei durch gängige wissenschaftstheoretische Paradigmen und Methodologien begründet sein“ [21]. Während der einzelnen Phasen des Forschungsprozesses hängt die Methodenauswahl maßgeblich vom Untersuchungsziel ab. Dieses sollte auf das konkrete Forschungsziel ausgerichtet sein und zu einem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn führen [21].

Dieses Kapitel gliedert sich in mehrere Abschnitte und widmet sich der Ausgestaltung und Begründung des Forschungsrahmens der vorliegenden Dissertation. Im ersten Abschnitt werden die Grundlagen der gestaltungsorientierten Forschung erläutert und deren Wahl und Anwendbarkeit für diese Arbeit als solches begründet. Darauf aufbauend erfolgt im zweiten Teil dieses Kapitels die Einordnung der in Kapitel 1.2 genannten Forschungsziele in das Forschungsparadigma der gestaltungsorientierten Forschung. Anschließend wird das konkrete Forschungsvorgehen der Arbeit dargelegt. Abschließend erfolgt im letzten Abschnitt dieses Kapitels eine kurze Zusammenfassung.

2.1 Grundlagen gestaltungsorientierter Forschung

Die gestaltungsorientierte Forschung (engl. Design Science Research) ist im Maschinenbau verwurzelt und unterscheidet sich von der klassischen Natur- und sozialwissenschaftlichen Forschung [22]. Nach Hevner et al. [23] ist das Ziel der traditionellen Forschung die Wahrheit, wohingegen das Ziel der gestaltungsorientierten Forschung die Nützlichkeit ist. In der traditionellen Wissenschaft entsteht neues Wissen lediglich durch die Erforschung, das Beschreiben und Erklären von bereits bestehenden Phänomenen [24]. Romme [25] kritisiert diese Art der Forschung, denn sie ist unzureichend für die Gestaltung und Entwicklung neuer Systeme und generiert kein Wissen über Dinge, die noch nicht existieren. Im Gegensatz dazu forciert die gestaltungsorientierte Forschung die Lösung von praktischen Problemen durch sogenannte Artefakte [22]. Dies sind künstlich vom Menschen erschaffene Dinge, die auf eine praktische Problemlösung ausgerichtet sind [22]. Sie lassen sich in Abhängigkeit ihres Abstraktionsgrades in Gestaltungstheorien, in Gestaltungswissen und anwendungsspezifische Instanziierungen einordnen [26]. March und Smith [27] unterteilen Artefakte in Konstrukte, Modelle, Methoden und Instanziierungen. Eine Ergänzung liefern Gregor und Hevner [26] durch die Argumentation, dass auch Theorien, Rahmenwerke, Architekturen und Gestaltungsprinzipien als Artefakte angesehen werden können. In der nachfolgenden Abbildung 3 ist die Einordnung der Artefakte in Anlehnung an Vaishnavi und Küchler [28] dargestellt.

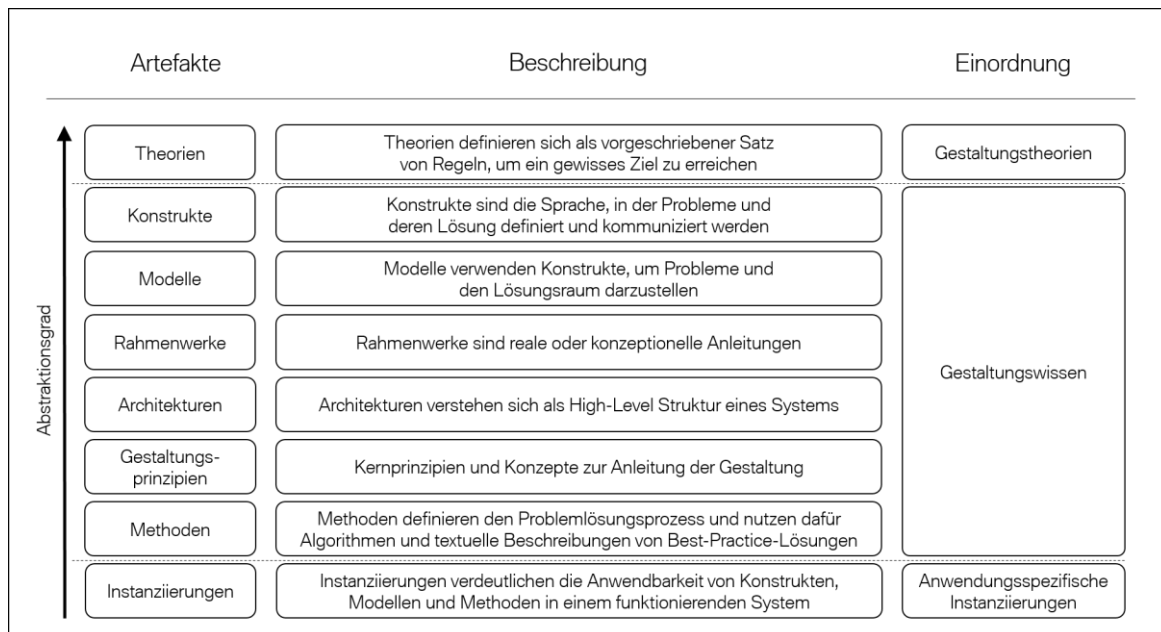


Abbildung 3: Einordnung der Artefakte in die gestaltungsorientierte Forschung.

Quelle: in Anlehnung an Vaishnavi und Küchler [28].

Das Vorgehensmodell der gestaltungsorientierten Forschung besteht grundsätzlich aus zwei Kernelementen, der Gestaltung und Evaluation von Artefakten zur Überprüfung ihrer Nützlichkeit [27]. Eine Erweiterung dieses Modells liefern Peffers et al. [29] durch die Einführung einer Methode, bestehend aus sechs Schritten. Im ersten Schritt wird zunächst ein ungelöstes, relevantes Problem identifiziert. Auf dieser Basis wird im zweiten Schritt die Zielsetzung zur Lösung des Problems definiert. Darauf aufbauend erfolgen im dritten Schritt die Gestaltung und Entwicklung der Artefakte, welche das identifizierte Problem lösen sollen. Im vierten und fünften Schritt werden die Artefakte instanziiert und in der Anwendungsdomäne evaluiert. Die Evaluierung ist essentiell in der gestaltungsorientierten Wissenschaft, denn sie überprüft die Nützlichkeit der erzeugten Artefakte und generiert neues Wissen [23]. „Ohne Evaluation sind die Erzeugnisse der gestaltungsorientierten Wissenschaft nur unbegründete Theorien“ [30]. Dabei wird das Ergebnis der Evaluation der Artefakte ständig mit dem formulierten Ziel abgeglichen. In Abhängigkeit des Ergebnisses müssen die Evaluationen iterativ wiederholt werden, um die Gestaltung der Artefakte zu optimieren und dessen Nützlichkeit zu steigern [31; 32]. Im letzten Schritt werden die Ergebnisse kommuniziert. Dies sollte durch wissenschaftliche Konferenzbeiträge, Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Vorträge in der Anwendungsdomäne geschehen [33]. Durch den Vergleich bestehender Vorgehensmodelle macht Wächter [34] klar, dass bis heute kein einheitliches Vorgehensmodell der gestaltungsorientierten Forschung vorherrscht. Dennoch liefern Vaishnavi und Kuechler ein grundlegendes Vorgehensmodell, welches die wesentlichen Kernelemente berücksichtigt (Abbildung 4).

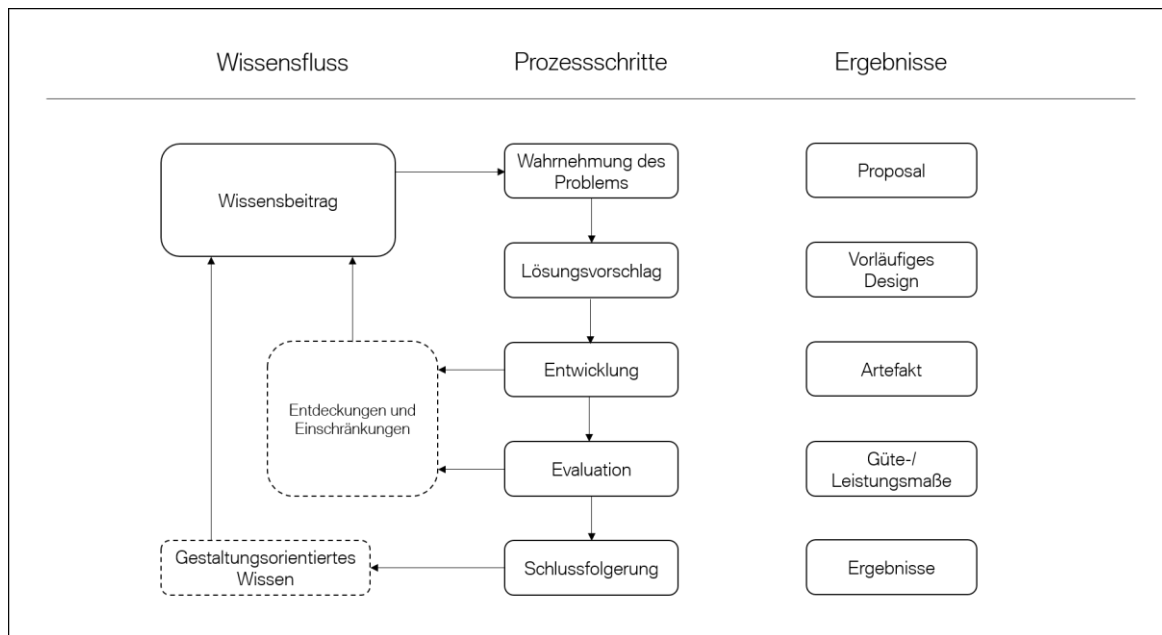


Abbildung 4: Vorgehensmodell der gestaltungsorientierten Forschung.

Quelle: in Anlehnung an Vaishnavi und Küchler [28].

Die gestaltungsorientierte Forschung kann grundsätzlich als Problemlösungsprozess angesehen werden, bei dem der Wissensbeitrag über ein gewisses Problem durch die Gestaltung und Anwendung von Artefakten generiert wird [23]. Auf Basis dieses fundamentalen Grundprinzips fordert Hevner [23] die Berücksichtigung und Einhaltung von sieben Richtlinien bei der Durchführung gestaltungsorientierter Forschung. Die Richtlinien sind in der nachfolgenden Abbildung 5 dargestellt und beschrieben.



Abbildung 5: Richtlinien der gestaltungsorientierten Forschung nach Hevner.

Quelle: in Anlehnung an Hevner [23].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die gestaltungsorientierte Forschung eine enge Kollaboration zwischen Wissenschaft und Praxis ermöglicht und die Lücken zwischen beiden Domänen schließen kann [33]. Die Auswahl der gestaltungsorientierten Forschung als Forschungsparadigma für diese Dissertation wird begründet durch die stringente Anwendung von verhaltenswissenschaftlichen Verfahren und Werkzeugen zum Problemverständnis bei gleichzeitiger Generierung von problemlösungsorientierten Artefakten [35]. Daher eignet sich dieser wissenschaftliche Forschungsrahmen zur Entwicklung eines Gestaltungskonzepts für AR-basiertes Training an manuellen Montagearbeitsplätzen im industriellen Nutzungskontext.

2.2 Einordnung der Forschungsziele

Das Gestaltungskonzept umfasst ein Vorgehensmodell mit konkreten Methodenempfehlungen zur Entwicklung AR-basierter Trainingssysteme, ein instanziiertes Assistenzsystem und spezifische Gestaltungsempfehlungen. Im Verlauf der Arbeit werden vier aufeinander aufbauende Forschungsfragen (Kapitel 1.2) beantwortet, wodurch das Gestaltungskonzept erarbeitet wird. Das methodische Vorgehen der Arbeit orientiert sich dabei an der gestaltungsorientierten Forschung. Becker et al. [36] unterteilen die Zielsetzung der gestaltungsorientierten Forschung in Erkenntnis- und Gestaltungsziele. Erkenntnisziele identifizieren Probleme in der praktischen Anwendungsdomäne und generieren ein umfassendes Verständnis dieser, wodurch Forschungslücken abgeleitet werden. Im Gegensatz dazu stehen die Gestaltungsziele, welche die Entwicklung von Artefakten zur Lösung eines realen Problems forcieren [23].

Das erste Artefakt, welches im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wird, ist ein Vorgehensmodell zur Gestaltung und Entwicklung von AR-basierten Trainingssystemen für manuelle Montagetätigkeiten im industriellen Nutzungskontext. Durch die Beantwortung der ersten Forschungsfrage werden zunächst grundlegende Anforderungen an die Gestaltung von gebrauchstauglichen AR-basierten Trainingssystemen generiert. Darauf aufbauend werden Methoden, Theorien und Modelle zur Gestaltung und Evaluation des Trainingssystems ausgewählt und zu einem Vorgehensmodell zusammengefasst. Mit Hilfe mehrerer Iterationsschritte wird dieses evaluiert und durch eine kontinuierliche Anpassung zu einem finalen Vorgehensmodell geformt. Dieses enthält konkrete Methoden- und Gestaltungshinweise zur Entwicklung AR-basierter Trainingssysteme für manuelle Montagetätigkeiten im industriellen Nutzungskontext.

Durch die Anwendung des Vorgehensmodells in der Anwendungsdomäne wird ein erster Prototyp des Trainingssystems instanziiert. Die Instanziierung ist das **zweite Artefakt**, welches im Rahmen dieser Arbeit erzeugt wird. Die empirische Erprobung des Prototyps ermöglicht die iterative Optimierung zu einem finalen gebrauchstauglichen System. Durch die Anwendung geeigneter Evaluationsmethoden können weitere Erkenntnisse über deren Anwendbarkeit und Nützlichkeit gewonnen werden, auf Basis dessen sich spezifische Methodenempfehlungen ableiten lassen. Die praktische Umsetzung des AR-basierten Trainingssystems soll es Anwendern ermöglichen, neue Montageprozeduren effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erlernen. Die Erprobung erfolgt dabei im industriellen Nutzungskontext am praktischen Beispiel der Motormontage. Mit Hilfe der iterativ durchgeführten Evaluationen kann die Nützlichkeit der Methoden des Vorgehensmodells überprüft werden.

Auf Basis der Erkenntnisse aus der iterativen Entwicklung des AR-basierten Trainingssystems für manuelle Montagetätigkeiten im industriellen Nutzungskontext lassen sich spezifische Gestaltungsempfehlungen ableiten, welche das **dritte Artefakt** darstellen und die Dissertation durch die Beantwortung der Forschungsfragen drei und vier abrunden.

Die Verortung der genannten Artefakte innerhalb der gestaltungsorientierten Forschung zeigt die nachfolgende Abbildung 6.

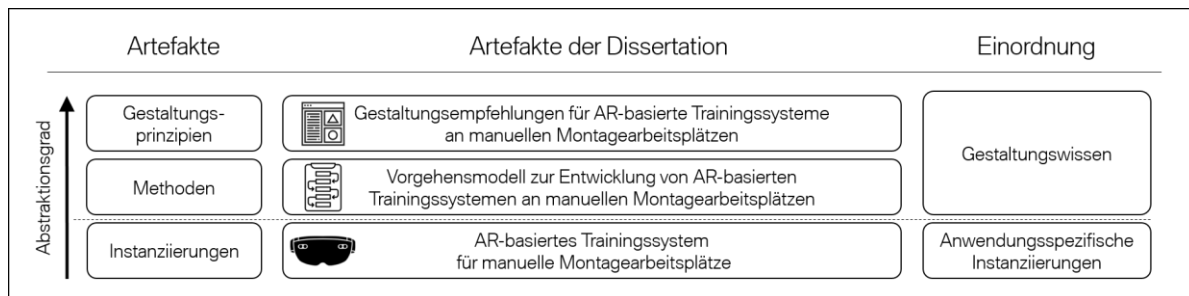


Abbildung 6: Verortung der Artefakte innerhalb der gestaltungsorientierten Forschung.

Quelle: in Anlehnung an Vaishnavi und Küchler [28].

2.3 Darlegung des Forschungsvorgehens

Wie in Kapitel 2.1 dargestellt, ist der Ausgangspunkt der gestaltungsorientierten Forschung die Identifikation eines relevanten Problems. Durch die stringente Anwendung von bereits vorhandenen Theorien, Modellen und Methoden sowie der Berücksichtigung von Anforderungen aus der Anwendungsdomäne wird das Problem gelöst [33]. Dadurch werden Artefakte generiert, die iterativ evaluiert und weiterentwickelt werden, wodurch deren Nützlichkeit überprüft wird [23]. Dieses iterative Vorgehensmodell nach Hevner ist in der nachfolgenden Abbildung 7 dargestellt. Es besteht aus drei Bereichen. Die Umgebung ist der Ursprung des Problems und liefert praxisrelevante Anforderungen aus den Bereichen Mensch, Organisation und Technologie. Die Wissensbasis liefert die Grundlagen und das Methodenwissen, um das praktische Problem zu lösen. Innerhalb der gestaltungsorientierten Forschung erfolgt die stringente Anwendung des nutzbaren Wissens zur Gestaltung und iterativen Weiterentwicklung von problemlösungsorientierten Artefakten. Dabei findet ein ständiger Abgleich mit den identifizierten Praxisanforderungen statt. Infolge der iterativen Gestaltung der Artefakte wird neues Wissen generiert, wodurch die Wissensbasis erweitert wird. Die praktische Problemlösung ist das Ergebnis der Anwendung der ausgestalteten Artefakte in der Anwendungsdomäne.

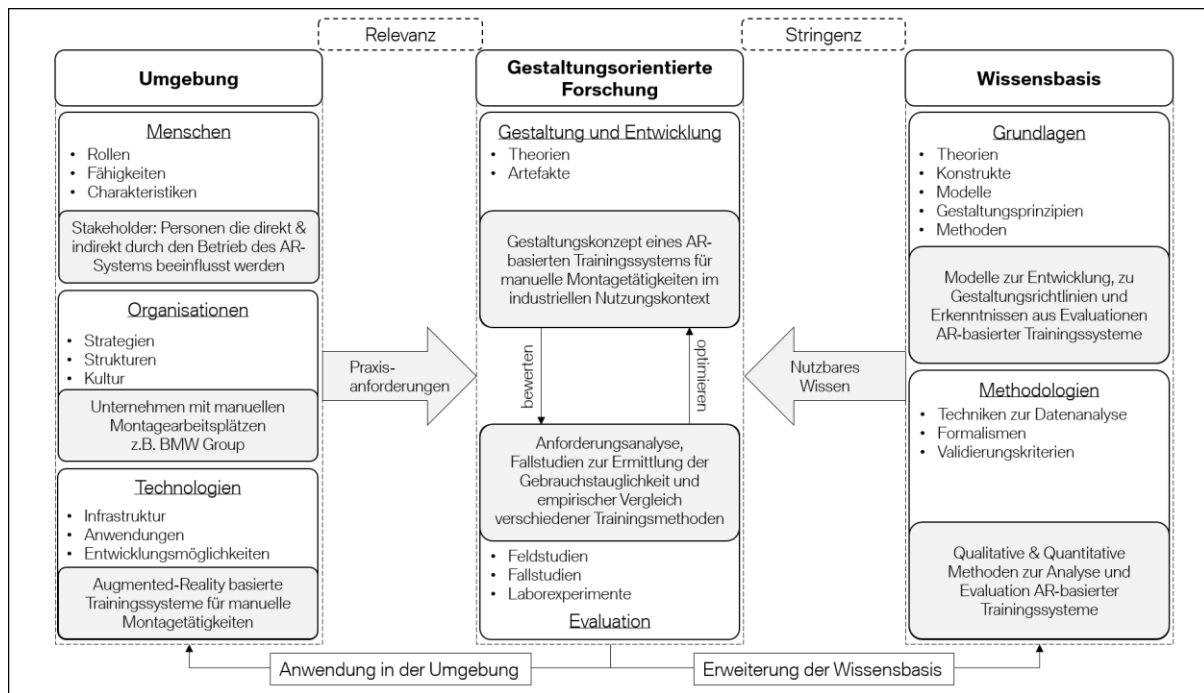


Abbildung 7: Einordnung der Dissertation in die gestaltungsorientierte Forschung.¹

Quelle: in Anlehnung an Hevner [23].

Im Zentrum der gestaltungsorientierten Forschung steht die iterative Entwicklung von drei Artefakten. Ein Vorgehensmodell zur Gestaltung von AR-basierten Trainingssystemen, der daraus resultierenden Instanziierung sowie Gestaltungsempfehlungen, die auf Basis empirischer Erprobungen mit dem System abgeleitet werden. Praxisrelevante Anforderungen resultieren aus der Analyse der Anwendungsdomäne (Umgebung) und fließen in die Gestaltung der genannten Artefakte ein. Als praktische Anwendungsdomäne dienen Unternehmen mit manuellen Montageprozessen und mit der Möglichkeit zur Anwendung von AR-basierten Trainingssystemen. Die Umgebungsanalyse in dieser Arbeit erfolgt am Beispiel der Motormontage in der Automobilproduktion der BMW Group. Für die Entwicklung des Gestaltungskonzepts liefert die Wissensbasis wichtige Grundlagen. Im Fokus der Analyse der Wissensbasis stehen insbesondere Modelle zur Entwicklung, Gestaltungsrichtlinien und Erkenntnisse aus vorhandenen Evaluationen AR-basierter Trainingssysteme. Auf Basis der Praxisanforderungen und des nutzbaren Wissens erfolgt die iterative Gestaltung der drei Artefakte. Deren Evaluation ist entscheidend, um neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu generieren und die Nützlichkeit der Artefakte zu überprüfen [30].

Die Erweiterung der Wissensbasis erfolgt durch die Erarbeitung eines Vorgehensmodells zur Entwicklung AR-basierter Trainingssysteme. Die Auswahl geeigneter Analyse- und Evaluationsmethoden bildet dazu die Basis. Komplettiert wird das Vorgehensmodell durch Gestaltungshinweise aus der Literatur und relevante Praxisanforderungen. Darauf aufbauend wird ein erstes prototypisches System instanziiert. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse, hinsichtlich der Gestaltung von AR-basierten Trainingssystemen sowie der Anwendbarkeit der ausgewählten Methoden, entstehen durch die empirische Erprobung und iterative Optimierung der Instanziierung und finalisieren das Vorgehensmodell.

¹ Die grau hinterlegten Bereiche in der Abbildung sind konkret auf die vorliegende Dissertation bezogen.

Der instanziierte Prototyp wird durch die iterative Erprobung und systematische Weiterentwicklung zu einem industrietauglichen AR-basierten Trainingssystem geformt. Anwender erhalten ein gebrauchstaugliches Assistenzsystem, das sie unterstützt, neue Montageprozeduren zu erlernen. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit des Systems bestätigt zudem die Nützlichkeit des Vorgehensmodells. Durch den Vergleich von AR-basiertem Montagetraining mit konventionellen Trainingsmethoden wird ein quantitativer Wirksamkeitsnachweis geliefert. Auf Basis der Erkenntnisse kann eine Potentialabschätzung zur Technologiereife im industriellen Nutzungskontext getroffen werden.

Das Forschungsvorgehen dieser Dissertation orientiert sich an dem Vorgehensmodell von Vaishnavi und Küchler [28] und berücksichtigt die Richtlinien gestaltungsorientierter Forschung nach Hevner [23]. Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt die Verortung der Forschungsfragen dieser Arbeit und die konkreten Ergebnisse der jeweiligen Prozessschritte des genannten Vorgehensmodells.

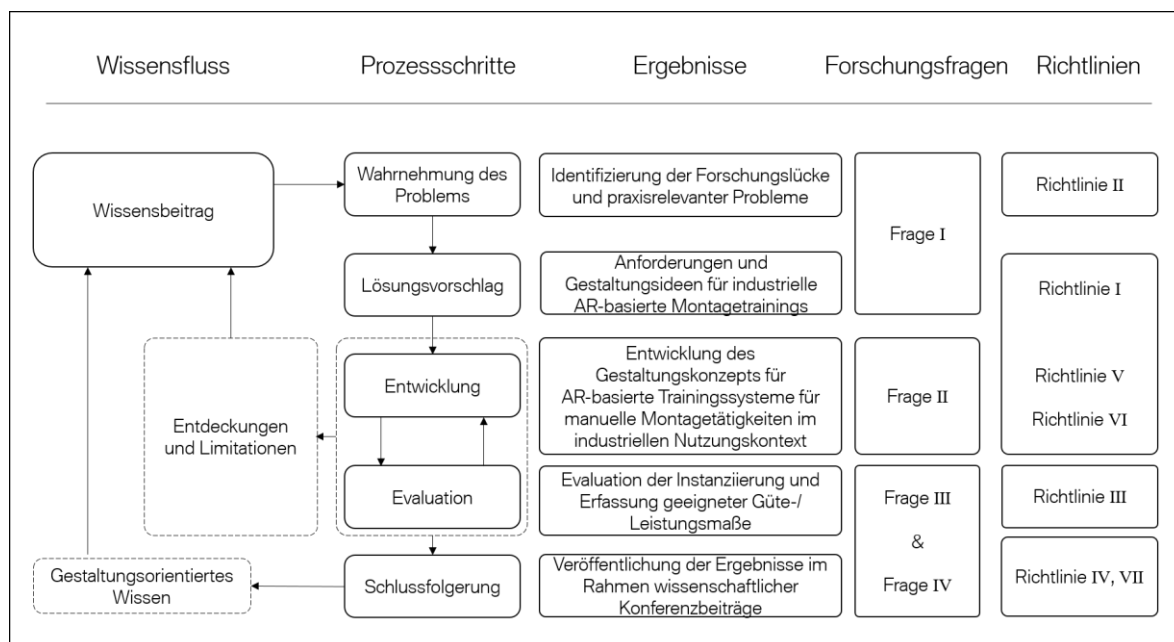


Abbildung 8: Verortung der Forschungsfragen in das Vorgehensmodell von Vaishnavi und Küchler.

Quelle: in Anlehnung an Vaishnavi und Küchler [28] sowie Hevner [23].

2.4 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurde der Forschungsrahmen für die vorliegende Dissertation dargelegt. Hierzu wurden zunächst die Grundlagen der gestaltungsorientierten Forschung erläutert und die Anwendbarkeit dieses Forschungsparadigmas für die Zielsetzung dieser Arbeit als solches begründet. Darauf aufbauend wurden die formulierten Forschungsziele dieser Arbeit eingeordnet und der wissenschaftliche Rahmen zugrunde gelegt. Abschließend erfolgte eine Einordnung des Forschungsvorgehens und der Forschungsfragen in das Vorgehensmodell der gestaltungsorientierten Forschung nach Vaishnavi und Kuechler [28].

Damit bildet dieses Kapitel die Grundlage für die Erarbeitung der Forschungsziele (vgl. Abbildung 1). Die Beschreibung der jeweiligen Methoden innerhalb der einzelnen Prozessschritte (vgl. Abbildung 8) erfolgt an den entsprechenden Stellen im weiteren Verlauf dieser Dissertation.

3 Stand-der-Technik

„Es ist nicht genug zu wissen, man muss auch anwenden. Es ist nicht genug zu wollen, man muss auch tun.“

Johann Wolfgang von Goethe, Dichter

Das Ziel dieses Kapitels ist die strukturierte Aufarbeitung der Wissensbasis zur Darlegung von Forschungslücken und zur Identifikation von Anforderungen an die Gestaltung und Entwicklung von AR-basierten Trainingssystemen für manuelle Montagearbeitsplätze. Im ersten Teil dieses Kapitels wird zunächst das Forschungsfeld eingeordnet und abgegrenzt. Darauf aufbauend wird im zweiten Teil dieses Kapitels eine strukturierte Literaturrecherche durchgeführt, wodurch die grundlegende Wissensbasis für die vorliegende Arbeit geschaffen wird. Darüber hinaus werden mehrere Forschungslücken aufgezeigt, welche die benannten Forschungsziele zu Beginn dieser Arbeit (vgl. Abbildung 1) als solches begründen. Ergänzend zu den Erkenntnissen und den Anforderungen aus der Literatur werden spezifische Anforderungen der Anwendungsdomäne erhoben. Zusammen liefern diese zum einen eine Antwort auf die erste Forschungsfrage und zum anderen einen initialen Lösungsvorschlag zur Gestaltung der Artefakte.

3.1 Einordnung und Abgrenzung des Forschungsfeldes

Zu Beginn dieses Abschnitts wird der Begriff der erweiterten Realität (engl. Augmented Reality [AR]) näher erläutert. Es folgt eine Darstellung verschiedener Anwendungsmöglichkeiten und die Einordnung dieser Arbeit in die Anwendungsdomäne des industriellen Montagetrainings. Darauf aufbauend werden verschiedene Technologien (Anzeigegeräte) zur Visualisierung von augmentierten Informationen vorgestellt und deren Eignung für manuelle Montagetätigkeiten diskutiert.

Aktuell existieren in der Literatur verschiedene Begriffsdefinitionen für die erweiterte Realität. Eine weit verbreitete und wissenschaftlich anerkannte Definition stammt von Azuma [6]. Dieser ordnet der erweiterten Realität drei wesentliche Eigenschaften zu:

- Reale und virtuelle Objekte können kombiniert werden.
- Der Benutzer kann in Echtzeit mit diesen virtuellen Objekten interagieren.
- Die Registrierung erfolgt im dreidimensionalen realen Raum.

Eine weitere Erklärung, die einen konkreten Bezug auf manuelle Montage- und Instandhaltungstätigkeiten herstellt, liefern Caudell & Mizell [37] und definieren AR als „Technologie zur Erweiterung des Sichtfelds eines Benutzers mit relevanten Informationen zur Ausführung einer bestimmten Aufgabe“. Neben der Erweiterung des visuellen menschlichen Sinns können nahezu alle menschlichen Sinne (hören, tasten, schmecken, riechen) erweitert werden [38]. Kipper und Rampolla [39] präsentieren hierzu eine weitere Definition: „Augmented Reality (AR) ist eine Variation der Virtuellen Realität (engl. Virtual Reality [VR]). Technologien der Virtuellen Realität lassen einen Benutzer komplett in eine künstliche Umgebung eintauchen, ohne dass dieser seine reale Umgebung wahrnehmen kann. Im Kontrast dazu nutzt die erweiterte

Realität digitale, Computer-generierte Informationen (Bilder, Ton, Video, haptische Empfindungen) und überlagert diese in Echtzeit in einer realen Umgebung“.

Das Spektrum zwischen der Realität und der Virtualität wird als gemischte Realität (engl. Mixed Reality [MR]) bezeichnet. Grundlage hierfür liefert das von Milgram [40] formulierte Virtuality Continuum (VC) in der nachfolgenden Abbildung 9. Dieses Konzept ermöglicht die Darstellung und Beschreibung von realen und virtuellen Umgebungen, inklusive aller darin enthaltenen Mischformen. Demnach ist MR ein Teil des Gesamtspektrums und beschreibt alle Mischformen zwischen den Extrema der Realität und der Virtualität. Die erweiterte Realität ist Teil der MR und befindet sich auf dem Gesamtspektrum in der Nähe der Realität. Im Gegensatz dazu steht die erweiterte Virtualität (engl. Augmented Virtuality [AV]), sie befindet sich in der Nähe zur Virtualität.

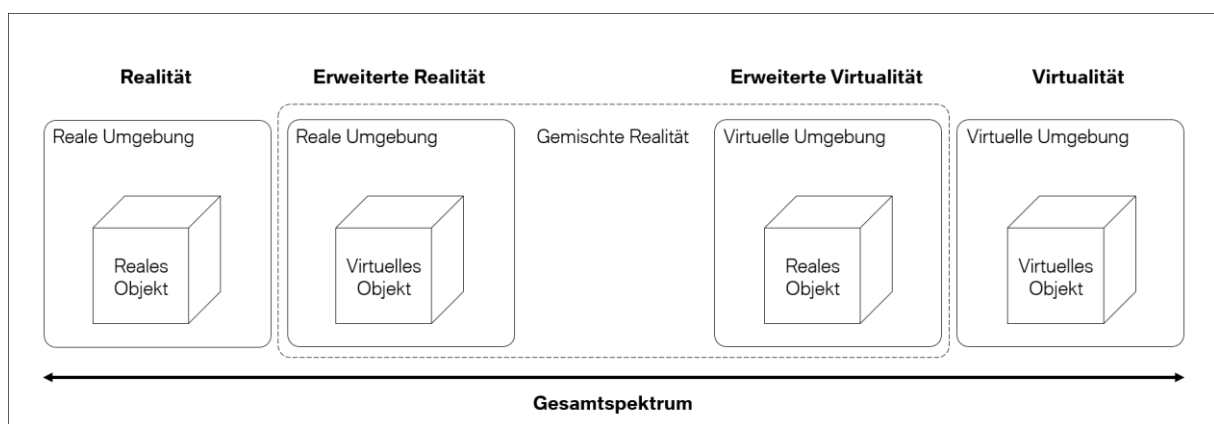


Abbildung 9: Das Virtuality Continuum (VC) nach Milgram.

Quelle: in Anlehnung an Milgram [40].

Insbesondere die Technologie der erweiterten Realität erhält zunehmendes Interesse in verschiedensten Anwendungsdomänen. Krevelen und Poelmann [41] unterteilen die Anwendungsgebiete in persönliche Informationssysteme, Militär, Industrie, Medizin, Unterhaltung, Büro und Ausbildung. Im Bereich der persönlichen Informationssysteme spielen insbesondere AR-basierte Navigationssysteme eine wichtige Rolle. Foeckler et al. [42] präsentieren hierfür eine Anwendung für Museumsführungen. Besucher erhalten zusätzliche virtuelle Informationen über verschiedenste Ausstellungsstücke. Eine weitere Anwendung zeigen Schmalstieg et al. [43]. Touristen erhalten eine Stadtführung und können Informationen zu verschiedenen Gebäuden abrufen. Im Militär kommt die Technologie häufig zur Anwendung, um Soldaten auszubilden und augmentierte Kriegsszenarien nachzustellen [44]. Im Bereich der Medizin werden AR-Technologien vermehrt für die laparoskopische Chirurgie eingesetzt. Dazu präsentieren Fuchs et al. [45] ein System, das durch eine dreidimensionale Überlagerung die Operationsprozedur simuliert. Das Potential von AR-Technologien, mit deren Fähigkeit zur Darstellung und Überlagerung von dreidimensionalen virtuellen Inhalten im realen Raum, wird durch Pietrzak et al. [46] für den Bereich der laparoskopischen Chirurgie bestätigt.

Im Bereich der Unterhaltungsindustrie wird AR häufig für Spiele genutzt, um beispielsweise augmentiertes Ping-Pong zu spielen [47] oder gegen virtuelle Kreaturen zu kämpfen [48]. Kollaborationsszenarien sind

insbesondere bei Büroanwendungen gefragt, bei denen sich mehrere Nutzer in einem MR-Umfeld zusammenfinden, um Ideen zu diskutieren. Ein Beispiel hierfür liefert Tamura [49] mit der Präsentation eines MR Besprechungsraums. Neben den genannten Anwendungsmöglichkeiten spielt AR auch eine zunehmende Rolle im Bereich der schulischen Ausbildung. Bower et al. [50] zeigen auf, dass der Einsatz von AR Technologien die Kreativität von Schülern steigern kann. Darüber hinaus zeigt Radu [51], dass AR-basiertes Lernen die Gedächtnisleistung von Studenten aufgrund eines immersiven Lernerlebnisses steigern kann.

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die industrielle Anwendungsdomäne. Fite-Georgel [52] identifiziert fünf mögliche Anwendungsbereiche für AR-Technologien im industriellen Nutzungskontext.

- Im Bereich des **Produktdesigns** fallen meist hohe Kosten an, da Prototypen aufwendig gefertigt werden müssen. Eine Lösung hierfür liefert Regenbrecht [53] und präsentiert ein System, das bei der schnellen und kostengünstigen Erstellung von digitalen Fahrzeugdesigns unterstützen kann.
- Durch die **Inbetriebnahme** erfolgt die Validierung und Dokumentation eines Produkts. Klinker et al. [54] präsentieren hierzu ein System für die Gebäudekonstruktion. Das System ist in der Lage, augmentierte Modifizierungen direkt am Gebäude anzuzeigen, um diese zu verifizieren und zu dokumentieren.
- Bei der **Instandhaltung** erfolgen die Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung eines Produkts [55]. Fiorentino et al. [56] zeigen in einem Vergleich zwischen einem AR-basierten Assistenzsystem und einer Papieranleitung, dass die Qualität und Effizienz der Instandhaltungstätigkeit durch das AR-System verbessert werden kann. Der Nutzer erhält durch das System visuelle, erweiterte Informationen und wird so Schritt-für-Schritt durch die Instandhaltungstätigkeit geführt.
- Die **Außerbetriebnahme** meint die Entsorgung und Wiederverwertung eines Produkts. Zokai et al. [57] präsentieren hierfür ein System zur Entsorgung und Umgestaltung eines Rohrsystems. Weitere Anwendungen existieren im Bereich der Außerbetriebnahme von Atomkraftwerken [58].
- Für den Bereich der **Montage** bietet der Einsatz von AR-Technologien besonders viel Potential. Tang et al. [59] zeigen auf, dass der Einsatz von AR-basierten Leitsystemen Montagefehler reduzieren kann. Darüber hinaus zeigen Hou et al. [9] durch einen empirischen Vergleich zwischen einem AR-basierten Leitsystem und einer Papieranleitung, dass neben der Qualität auch die Effizienz der Montage gesteigert werden kann. Das Potential zur Qualitäts- und Effizienzsteigerung manueller Montageprozesse durch AR-basierte Leitsysteme wird durch weitere wissenschaftliche Untersuchungen untermauert [60; 61].

Lotter und Wiendahl [62] unterteilen die Montage in automatische-, halbautomatische- und manuelle Montage. Die automatische Montage erfolgt ausschließlich maschinell und zielt darauf ab, wenige Varianten in hoher Stückzahl zu fertigen. Im Gegensatz dazu steht bei der manuellen Montage der Mensch im Mittelpunkt und führt „durch den Einsatz seiner Hände, seiner Fingerfertigkeit, seiner Sinnesorgane und

seiner Intelligenz mit Hilfe von Werkzeugen die Montagevorgänge aus“ [63]. Dadurch können viele Varianten sehr flexibel und kostengünstig produziert werden. Die Ausbildung neuer Mitarbeiter hat dabei einen direkten Einfluss auf die Qualität des zu montierenden Produkts, da eine unzureichende Mitarbeiterqualifizierung das Risiko für Montagefehler erhöht. Demzufolge fordert die Qualitätsmanagement Norm [64] der Automobilindustrie (IATF 16949:2016) eine „praktische Ausbildung am Arbeitsplatz“ zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen einer Organisation. Webel et al. [11] machen klar, dass sich ein AR-basiertes Trainingssystem deutlich von einem AR-basierten Leitsystem unterscheiden muss. Es muss so gestaltet werden, dass es die zugrundeliegenden sensomotorischen und kognitiven Fähigkeiten eines Benutzers trainiert und diesen nicht nur Schritt-für-Schritt durch eine Montageprozedur leitet. In einem direkten Vergleich zwischen AR-basiertem Training und konventionellen Video-basiertem Training zeigen Webel et al. [65], dass der Wissenstransfer durch AR gesteigert werden kann.

Wang et al. [19] legen dar, dass es derzeit an Gestaltungsrichtlinien und Evaluationen von AR-basierten Trainingssystemen für manuelle Montage Tätigkeiten fehlt. Daher widmet sich diese Dissertation der Erarbeitung eines Gestaltungskonzepts für AR-basierte Trainingssysteme an manuellen Montagearbeitsplätzen im industriellen Nutzungskontext. Die beschriebene Einordnung in das Forschungsfeld wird in der nachfolgenden Abbildung 10 grafisch zusammengefasst.

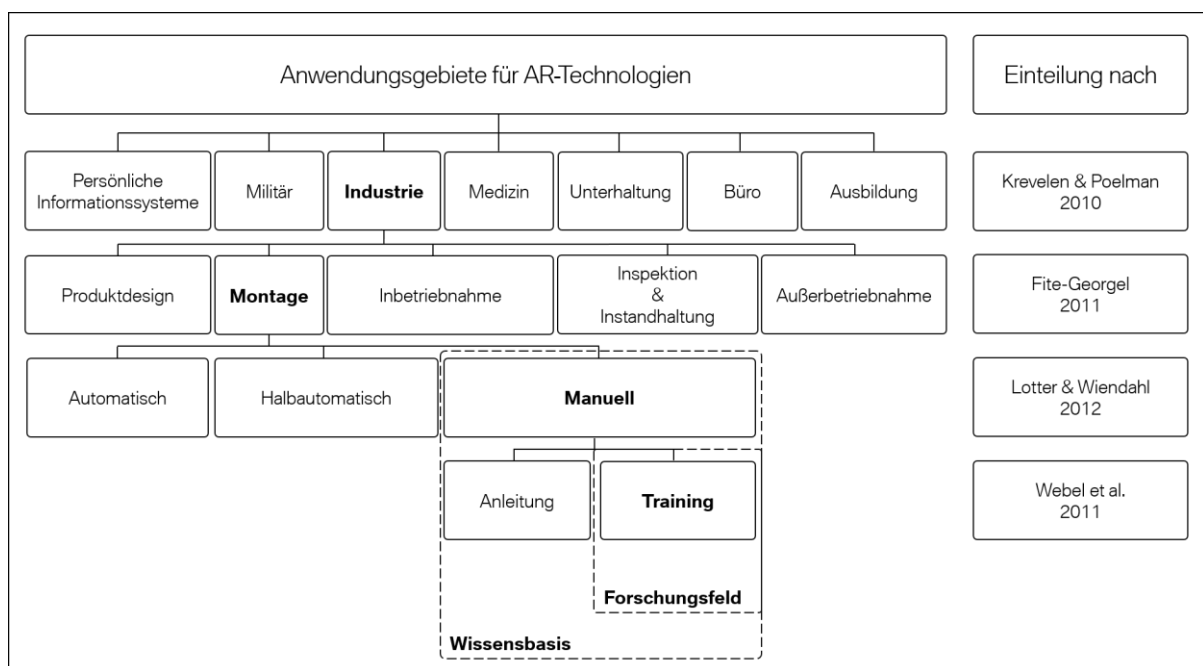


Abbildung 10: Einordnung der Dissertation in das Forschungsfeld.

Quelle: eigene Darstellung.

Grundsätzlich besteht ein AR-System aus sechs Hauptkomponenten. Über ein **Kamerasystem** erfolgt die Erfassung der realen Umgebung. Mit Hilfe eines **Datenerhaltungssystems** wird eine virtuelle Umgebung mit computergenerierten Informationen zur Verfügung gestellt. Darauf aufbauend erzeugt der **Renderer** ein perspektivisches Bild dieser virtuellen Umgebung. Ein **Trackingsystem** bestimmt die Lage des Benutzers im realen Raum und liefert dem Renderer die Eingangsdaten zur Erzeugung

des perspektivischen Bilds. Über einen sogenannten **Mischer** werden das reale und das virtuelle Bild zusammengeführt und über ein **Ausgabegerät** dargestellt. [66]

Als Ausgabegeräte dienen Smartphones & Tablets (engl. Hand-held Devices), am Kopf befestigte Anzeigen (engl. Head-Mounted Displays– HMD) und Projektionsgeräte (engl. Projection-based). Die freihändige Bedienung (engl. hands-free) ist eine grundlegende Anforderung an die Gestaltung von Assistenzsystemen zur Unterstützung manueller Montagetätigkeiten. Montagearbeiter benötigen während der Montage beide Hände, um Bauteile zu handhaben und notwendige Werkzeuge bedienen zu können [67]. Hand-held Devices erfüllen diese Bedingung nicht und werden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Die Betrachtung von Projektionsgeräten zur Unterstützung von Montagetätigkeiten wird aufgrund der eingeschränkten Mobilität und mangelnder Privatsphäre ebenfalls ausgeschlossen. Die Anordnung von Projektoren erfolgt meist stationär² und ermöglicht lediglich die Darstellung von zweidimensionalen Inhalten aus einer vorgegebenen Projektionsrichtung. Dadurch kann es zur Verdeckung der Visualisierung (engl. self-occlusion) kommen, weil sich ein Montagearbeiter während der Montage (z.B. eines Motors) permanent um das zu montierende Objekt bewegt, um verschiedenste Bauteile an wechselnden Positionen installieren zu können [7]. Darüber hinaus schränkt die Darstellung von virtuellen Informationen mittels projektionsbasierter AR die Privatsphäre der Benutzer ein, da Informationen für jedermann sichtbar sind [69].

Head-Mounted Displays hingegen ermöglichen durch eine freihändige, mobile Nutzung die Bereitstellung von privaten virtuellen Informationen im direkten Sichtfeld des Benutzers bei gleichzeitiger Ausführung der Montagetätigkeit. Grundsätzlich existieren zwei verschiedene Arten von AR-basierten HMDs [70]:

- Video-See-Through-HMD (VST-HMD): Bei dieser Art des HMDs wird die reale Umgebung durch zwei Kameras aufgenommen und digitalisiert. Dabei befindet sich der Benutzer in einem geschlossenen System und nimmt seine Umgebung nur über die Kameras wahr. Das digitalisierte Bild der realen Umgebung kann durch zusätzliche Informationen angereichert werden. Eine schlechte Auflösung der Kameras oder eine Diskrepanz zwischen der Realität und dem digitalisierten Bild kann zur Desorientierung des Nutzers führen [71]. Diese impliziert eine mangelnde Akzeptanz und stellt ein erhöhtes Sicherheitsrisiko, besonders in einer industriellen Umgebung, dar. Demnach empfehlen Syberfeldt und Danielsson [72] die Nutzung von Optical-See-Through-HMDs.
- Optical-See-Through-HMD (OST-HMD): Informationen werden bei dieser Art des HMDs über einen halb-transparenten Spiegel eingeblendet. Dieser ist leicht geneigt und befindet sich vor den Augen des Benutzers. Dadurch können augmentierte Inhalte wahrgenommen werden, während die reale Umgebung intakt bleibt. Das erste OST-HMD wurde bereits 1965 von Ivan Sutherland entwickelt [73]. Seitdem hat sich die Technologie durch den rasanten Fortschritt in den letzten Jahren weiterentwickelt. Verfügbare Geräte eignen sich bereits heute für den Gebrauch im industriellen Nutzungskontext [74]. Das Sichtfeld (engl. field-of-view³ [FOV]) und die Batterielaufzeit haben sich vergrößert, während sich das Gewicht der HMDs reduziert hat.

² Dieses Kriterium wird nur teilweise erfüllt, da Funk et al. [68] ein erstes mobiles System für die Kommissionierung präsentiert.

³ Beschreibt den Bereich des halb-transparenten Displays, innerhalb dessen Informationen visualisiert werden können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich insbesondere HMDs zur Unterstützung manueller Montagetätigkeiten eignen. Dementsprechend werden Hand-held Devices und Projektoren im Rahmen dieser Dissertation nicht näher betrachtet. Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt die Einordnung des Forschungsfelds und die Bewertung der beschriebenen Ausgabegeräte hinsichtlich der genannten grundlegenden Anforderungen an manuelle Montagetätigkeiten.

Tabelle 1: Eignung AR-basierter Ausgabegeräte für manuelle Montagetätigkeiten.

Quelle: eigene Darstellung.

Grundlegende Anforderungen an AR-basierte Ausgabegeräte für manuelle Montagetätigkeiten			
Ausgabegerät	Freihändig nutzbar	Mobil einsetzbar	Private Informationsbereitstellung
Hand-held Devices	○	●	●
Head-Mounted Displays	●	●	●
Projektoren	●	◐	○
Legende	Bedingung erfüllt ●	Bedingung teilweise erfüllt ◐	Bedingung nicht erfüllt ○

3.2 Strukturierte Aufarbeitung der Wissensbasis

In diesem Kapitel erfolgt die strukturierte Aufarbeitung der Wissensbasis im Bereich des AR-basierten Montagetrainings. Nach Cronin et al. [75] ist das Ziel einer Literaturrecherche die Darlegung des derzeitigen Wissensstands und die Identifikation von Forschungslücken, wodurch die Notwendigkeit wissenschaftlicher Forschung in einem bestimmten Bereich begründet wird. Dabei ist die Erarbeitung der relevanten Literatur „keine Zusammenstellung von Zufallsfunden, sondern das Ergebnis einer zielgerichteten Suche“ [21]. Die systematische Vorgehensweise muss dabei in allen Phasen explizit erläutert werden, einen umfassenden Überblick der relevanten Literatur geben und reproduzierbar für andere Wissenschaftler sein [76]. Dabei gewährleistet die Nutzung wissenschaftlicher Online-Datenbanken mit Peer-Review geprüften Publikationen eine hohe Qualität [77].

Nachfolgend wird das Vorgehensmodell der Literaturanalyse detailliert beschrieben und auf den Bereich des AR-basierten Trainings angewandt. Folglich wird die Wissensbasis systematisch und reproduzierbar erarbeitet, wodurch wissenschaftliche Forschungslücken identifiziert werden können. Die Vorgehensweise der strukturierten Literaturanalyse orientiert sich dabei an dem Vorgehensmodell von Wächter [78]. Der Prozess gliedert sich in vier Phasen und ist in der nachfolgenden Abbildung 11 dargestellt.

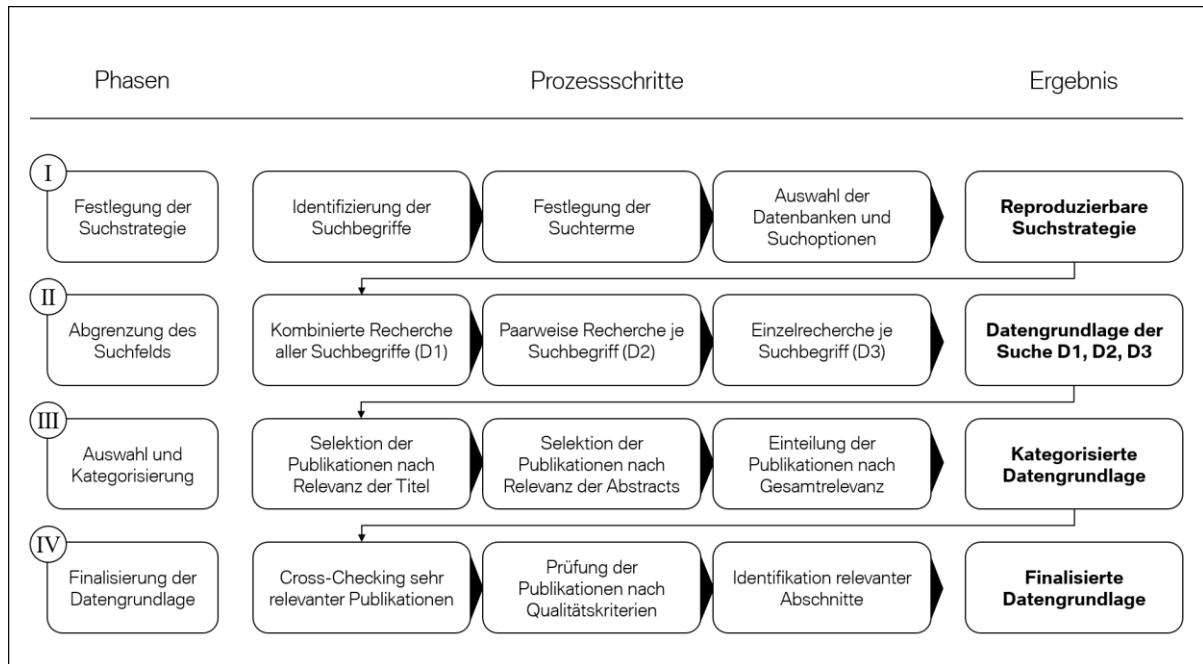


Abbildung 11: Vorgehensmodell zur strukturierten Aufarbeitung der Literatur.

Quelle: in Anlehnung an Wächter [78].

In der ersten Phase wird zunächst die Suchstrategie festgelegt. Diese beginnt mit der Identifikation von geeigneten Suchbegriffen, abhängig vom jeweiligen Forschungsfeld. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, beschränkt sich die vorliegende Dissertation auf die Wissensbasis AR-basierter Trainingssysteme für manuelle Montagetätigkeiten. Für die Suche werden ausschließlich englischsprachige Suchterme verwendet, da relevante Publikationen vorrangig auf internationalen Konferenzen publiziert werden. Demzufolge bezieht sich die Literaturrecherche auf folgende Suchbegriffe:

- Der erste Suchterm (S1)- „**Augmented Reality**“ spezifiziert die Technologie. Diese Begrifflichkeit wird stringent in deutsch- und englischsprachigen Publikationen verwendet, sodass keine weiteren Synonyme des Suchterms nötig sind.
- Der zweite Suchterm (S2)- „**Training**“ beschreibt das Anwendungsfeld der Technologie. Weitere Synonyme sind auch hier nicht nötig, da sich der Suchterm in der deutschen und englischen Sprache nicht unterscheidet.
- Der dritte Suchtermin (S3)- „**Assembly**“ verfeinert die Suche und schränkt die Anwendungsdomäne auf den Bereich der Montage ein.

Die Auswahl geeigneter Datenbanken erfolgt auf Basis vorangegangener Literaturrecherchen im Bereich der erweiterten Realität. Dünser et al. [79] ermittelten Evaluationsmethoden im Bereich AR-basierter Nutzerstudien und identifizierten drei wesentliche Datenbanken: ACM Digital Library, IEEE Xplore und SpringerLink. Weitere Onlinedatenbanken liefern Wang et al. [16] mit ihrer Recherche nach relevanten Publikationen im Bereich der AR-basierten Montage: ScienceDirect, Web of Science und Google Scholar. Zusätzlich wird die Datenbank EBSCOhost für die Suche verwendet, da sie neben den genannten Daten-

banken eine umfangreiche Sammlung an Veröffentlichungen mit technischen, soziologischen und psychologischen Schwerpunkten aufweist. Die Suchoptionen der Datenbanken werden so eingestellt, dass eine Recherche der Suchbegriffe innerhalb des Titels, des Abstracts und der Keywords einer Publikation möglich ist. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Datenbanken gewährleistet und die Suche auf die wesentlichen Veröffentlichungen eingeschränkt. Innerhalb der Datenbanken Google Scholar und Springer-Link ist die explizite Suche im Abstract und in den Keywords nicht möglich, sodass nur im Titel gesucht werden kann.

Auf Basis der reproduzierbaren Suchstrategie wird in der zweiten Phase das Suchfeld abgegrenzt. Zunächst werden alle Suchbegriffe durch den booleschen Operator „AND“ verknüpft, wodurch die erste Datengrundlage (D1) gebildet wird. Die Datengrundlage D2 wird im zweiten Schritt durch die paarweise Verknüpfung der Suchbegriffe gebildet, sofern es an Suchergebnissen mangelt. Sollten die ersten zwei Suchdurchläufe nicht das gewünschte Ergebnis liefern, kann die Datengrundlage D3 mit der Einzelsuche je Suchbegriff die gesamte Datengrundlage erweitern. In der nachfolgenden Tabelle 2 werden die Suchergebnisse in den jeweiligen Online-Datenbanken zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 2: Datengrundlage incl. aller Dopplungen⁴

Quelle: eigene Darstellung.

Online Datenbanken	Option	Datengrundlage D1		Datengrundlage D2		Datengrundlage D3		
		S1 + S2 + S3	S1 + S2	S1 + S3	S2 + S3	S1	S2	S3
ACM DL	Abstract	5	72	38	110	1958	15689	3432
	Titel	2	23	14	4	1158	2083	734
	Keyword	1	23	14	5	1974	1433	369
IEEE Xplore	Abstract	10	276	75	500	4666	122234	27590
	Titel	1	52	19	29	2597	16892	7627
	Keyword	1	31	22	17	2478	6978	2504
Science Direct	Abstract							
	Titel	9	120	49	310	1327	122910	85225
	Keyword							
Web of Science	Abstract							
	Titel	39	644	194	1887	7905	502195	283034
	Keyword							
Google Scholar	Titel	12	168	55	3	27900	672000	536000
SpringerLink	Titel	148	672	221	0	1522	20991	9086
EBSCOhost	Abstract	4	72	27	563	2190	188898	44755
	Titel	0	11	11	11	795	41245	8419
	Keyword	0	11	12	17	399	9765	2683
Datengrundlage incl. Dopplungen		232	2175	751	3456	56869	1723313	1011458

Die Datengrundlage D1 enthält aufgrund der Verknüpfung aller Suchbegriffe die relevantesten Publikationen im Bereich des AR-basierten Montagetrainings, allerdings ist die Anzahl der Publikationen sehr limitiert. Bereits an dieser Stelle lässt sich ein Forschungsbedarf vermuten. Demzufolge resultiert die Kategorisierung der Publikationen hinsichtlich ihrer Relevanz auf Basis der Datengrundlage D2 mit den Suchtermen S1 und S2. Diese Datenbasis enthält alle wesentlichen Veröffentlichungen zum Thema des AR-basierten Trainings und bietet die Möglichkeit, domänenübergreifendes Wissen zu nutzen. Zunächst

⁴ Der Zugriff auf die genannten Onlinedatenbanken erfolgt über den Shibboleth Zugang der Technischen Universität Ilmenau. Die letzte Suche erfolgte im April 2018, ohne Einschränkung des Publikationszeitraums.

werden durch Prüfung der Publikationstitel alle Dopplungen entfernt, wodurch 1610 Veröffentlichungen verbleiben. Im nächsten Schritt werden die Abstracts jeder Publikation geprüft und auf Basis der darin enthaltenen Informationen folgende Kategorien gebildet: Medizin, Militär, Unterhaltung, Ausbildung, Industrie und Technologie-Beschreibungen. Die nachfolgende Tabelle 3 zeigt die domänenspezifische Kategorisierung der Datengrundlage D2 ohne Dopplungen. Es wird ersichtlich, dass die meisten Veröffentlichungen die medizinische Anwendungsdomäne adressieren und viele technische Beschreibungen vorliegen. Hierzu gehören vorrangig Publikationen zum Thema „Tracking“.

Tabelle 3: Domänenspezifische Kategorisierung der Datenbasis.

Quelle: eigene Darstellung.

Medizin	Militär	Unterhaltung	Ausbildung	Industrie	Technologie Beschreibungen	Datenbasis D2 excl. Dopplungen
468	37	139	290	300	376	1610

Für die vorliegende Dissertation sind allerdings nur die 300 Publikationen im industriellen Bereich von Bedeutung. Durch erneute Prüfung dieser, konnten **136 Beiträge im Anwendungsbereich der Montage** identifiziert werden. Diese Datenbasis (D2.1) bildet die Grundlage für die Einteilung hinsichtlich der Relevanz der Veröffentlichungen, bezogen auf das Forschungsfeld dieser Arbeit. Die Kategorisierung erfolgt in A, B und C Literatur. Publikationen mit der Einteilung A-Literatur haben eine hohe Relevanz, B-Literatur weist eine mittlere Relevanz auf und sollte ggfs. näher geprüft werden. Eine geringe Relevanz für diese Arbeit hat die C-Literatur und kann daher vernachlässigt werden. Basierend auf den Forschungszielen dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 1.2) ergeben sich die Kriterien, welche für eine A-Kategorisierung erfüllt sein müssen:

- Vorgehensmodelle zur Entwicklung gebrauchstauglicher AR-basierter Trainingssysteme.
- Gestaltungsempfehlungen zur Entwicklung gebrauchstauglicher AR-basierter Trainingssysteme.
- Evaluationen AR-basierter Trainingssysteme hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit und/oder ihres Trainingseffekts (d.h. Ermittlung des transferierten Wissens durch das Trainingssystem).

Die nachfolgende Tabelle 4 bildet den Abschluss der dritten Phase der strukturierten Literaturrecherche und zeigt die kategorisierte Datengrundlage D2.1 in A, B und C Literatur.

Tabelle 4: Kategorisierte Datengrundlage D2.1 in A, B und C Literatur.

Quelle: eigene Darstellung.

A-Literatur „sehr relevant“	B-Literatur „relevant“	C-Literatur „nicht relevant“	Datenbasis D2.1 excl. Dopplungen
18	17	101	136

In der vierten und letzten Phase erfolgt die Finalisierung der Datenbasis. Diese beginnt mit dem Cross-Checking der A und B Literatur. Hierbei werden die Literaturquellen der relevantesten Publikationen gesichtet und auf Basis der Relevanz der Titel ausgewählt. Die nachfolgende Tabelle 5 gibt Aufschluss über die finalisierte Datengrundlage.

Tabelle 5: Finale kategorisierte Datengrundlage (D2.2) der vorliegenden Dissertation.

Quelle: eigene Darstellung.

	A-Literatur „sehr relevant“	B-Literatur „relevant“	C-Literatur „nicht relevant“	Summe excl. Dopplungen
Datenbasis D2.1	17	18	101	136
Cross-Checking	9	67	22	98
Finale Datenbasis D2.2	26	85	123	234

Durch das Cross-Checking der relevantesten Publikationen konnten 98 weitere Beiträge identifiziert werden. Diese wurden auf Basis ihrer Abstracts klassifiziert, wodurch die finale Datenbasis gebildet wird. Sie beinhaltet Vorgehensmodelle und Gestaltungshinweise zur Entwicklung gebrauchstauglicher AR-basierter Systeme sowie konkrete Erkenntnisse zum Einsatz dieser Systeme am Beispiel manueller Montage-tätigkeiten. Diese wissenschaftlichen Publikationen werden im nachfolgenden Abschnitt zu Grunde gelegt.

3.3 Darlegung der finalen Datenbasis

Die relevantesten Publikationen zum aktuellen Stand-der-Technik werden in diesem Abschnitt näher beschrieben und analysiert [80]. Hierfür werden zunächst die Vorgehensmodelle zur Entwicklung AR-basierter Trainingssysteme erläutert. Danach werden die bestehenden Gestaltungsempfehlungen dargelegt. Es folgt eine Beschreibung der identifizierten Evaluationen. Diese Wissensbasis liefert erste Erkenntnisse zur Gestaltung und Erprobung AR-basierter Trainingssysteme. Darüber hinaus lassen sich aus dieser Datengrundlage Forschungslücken ableiten, welche die Notwendigkeit dieser Dissertation begründen und weiterführende Forschungspotentiale aufzeigen.

3.3.1 Vorgehensmodelle zur Entwicklung AR-basierter Trainingssysteme

Die Entwicklung von gebrauchstauglichen AR-Systemen erfordert laut Navab [81] ein umfangreiches Verständnis der industriellen Prozesse und der Nutzerbedürfnisse, um zuverlässige, benutzerfreundliche, skalierbare und wertschöpfende Lösungen zu gestalten. Demnach muss ein Vorgehen gewählt werden, bei dem die Wünsche und Bedürfnisse potentieller Systemnutzer im Mittelpunkt stehen und diese frühzeitig in die Entwicklung einbezogen werden [82; 83].

Ein erstes Vorgehensmodell zur Gestaltung und Evaluation von gebrauchstauglichen VR-Systemen liefern Gabbard et al. [84]. In einem weiteren Beitrag bestätigen sie die Anwendbarkeit dieses Modells auch für eine mobile AR-Anwendung [85]. Daher ist dieses Modell für die vorliegende Dissertation relevant.

Die nachfolgende Abbildung 12 veranschaulicht das Vorgehen, welches sich in vier sequentielle Schritte gliedert.

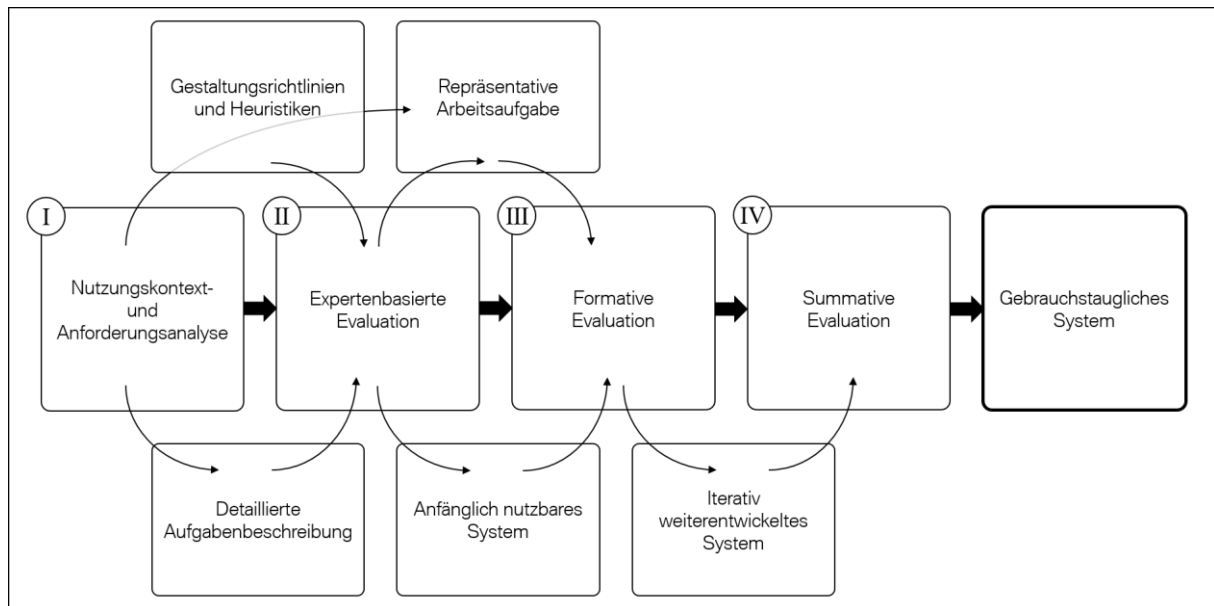


Abbildung 12: Vorgehensmodell zur Gestaltung und Evaluation von VR-Systemen.

Quelle: in Anlehnung an Gabbard et al. [84].

Im ersten Schritt erfolgt die Nutzungskontext- und Anforderungsanalyse. Das Ziel dieser Analyse ist es, die Umgebung, die Arbeitsaufgaben und die Anforderungen potentieller Nutzer eines interaktiven Systems zu verstehen und im Detail zu beschreiben. Dieses Verständnis ist wichtig, um die Gestaltung der Funktionalitäten des Systems darauf auszurichten. Eine fehlende, unvollständige oder schlechte Beschreibung des Kontexts und der Benutzer führt in der Regel zu einer schlechten Systemgestaltung mit mangelnder Gebrauchstauglichkeit [84].

Im zweiten Schritt evaluieren drei bis fünf Experten den initial gestalteten Prototyp [86]. Dabei versetzen sie sich in die Lage eines potentiellen Nutzers und absolvieren typische Arbeitsabläufe mit dem interaktiven System. Das Ziel dieser Erprobung ist es, Schwachstellen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit zu identifizieren. Dazu nutzen sie bestehende Gestaltungsrichtlinien/ Heuristiken und prüfen, ob diese bei der Auslegung des Systems berücksichtigt wurden. Missachtungen werden schriftlich dokumentiert. Auf Basis der daraus resultierenden Erkenntnisse ergeben sich Vorschläge zur Optimierung des prototypischen Systems.

Im dritten Schritt wird das anfänglich nutzbare System von zukünftigen Nutzern im spezifischen Nutzungskontext im Rahmen einer formativen Evaluation erprobt. Dabei absolvieren die Probanden eine repräsentative Arbeitsaufgabe. Während der Erprobung erheben Evaluatoren qualitative und quantitative Daten, welche die Gebrauchstauglichkeit des Systems bewerten sollen. Aus den Ergebnissen werden Optimierungspotentiale abgeleitet. Daraufhin wird das System verbessert und die Evaluation wiederholt. Dieses Vorgehen wird iterativ wiederholt, solange bis ein vorgegebenes Ziel erreicht ist [87].

Im vierten und letzten Schritt wird das iterativ weiterentwickelte System einer summativen Evaluation unterzogen. Dabei wird es im Vergleich zu Alternativprodukten von Endanwendern getestet. Zur Bewertung der verschiedenen Systeme werden typischerweise quantitative Messgrößen (z.B. Zeit) verwendet. Mit Hilfe einer statistischen Datenauswertung kann das beste System ermittelt werden.

Ein weiteres Vorgehensmodell präsentieren Chimienti et al. [88]. Es zielt darauf ab, AR-basierte Systeme zu entwickeln, um Personen bei der Ausführung von manuellen Montagetätigkeiten zu unterstützen. Das Vorgehen ist in der nachfolgenden Abbildung 13 schematisch dargestellt.

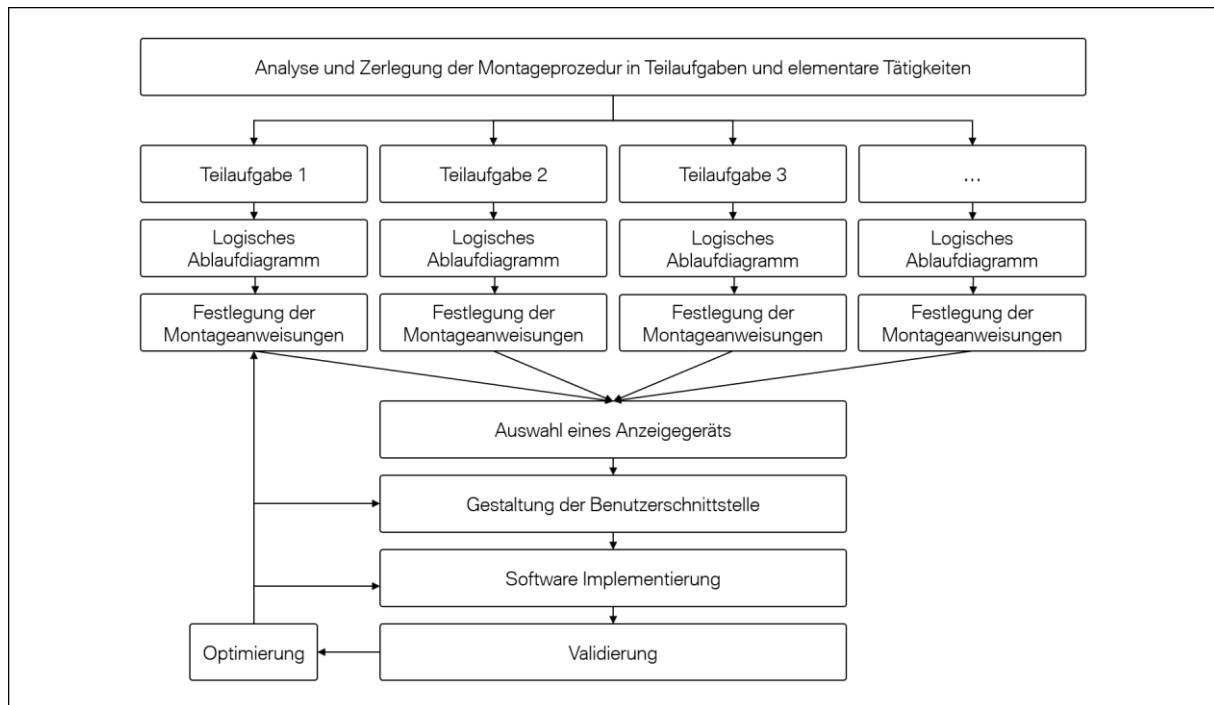


Abbildung 13: Vorgehen zur Entwicklung von AR-basierten Montageassistenzsystemen.

Quelle: in Anlehnung an Chimienti et al. [88].

Zu Beginn erfolgt die Analyse der Montageprozedur. Dabei werden die Hauptaufgaben in Teilaufgaben zerlegt und die elementaren Tätigkeiten in logischen Ablaufdiagrammen zusammengefasst. Dadurch können Informationen (z.B. Teilebezeichnungen) gewonnen werden, welche für die Systemgestaltung wichtig sind. Auf Basis der daraus resultierenden Erkenntnisse erfolgt die Festlegung der Montageanweisungen für jede Tätigkeit. Dies können Textinhalte mit entsprechenden Tätigkeitsbeschreibungen, Symbole (z.B. Sicherheitshinweise) oder augmentierte 3D-Überlagerungen sein, welche die Position eines zu montierenden Bauteils anzeigen. Zur Visualisierung dieser Informationen können HMDs, Hand-held Devices und Projektoren verwendet werden. Dem Nutzungskontext entsprechend wird eins dieser Anzeigeräte ausgewählt [88]. Für dieses werden im Anschluss die Benutzerschnittstelle⁵ (engl. User Interface [UI]) gestaltet und alle Softwarefunktionalitäten implementiert. Durch die Validierung des Systems mit potentiellen

⁵ Die Benutzerschnittstelle umfasst laut DIN EN ISO 9241-210:2010 „alle Bestandteile eines interaktiven Systems (Software oder Hardware), die Informationen und Steuerelemente zur Verfügung stellen, die für den Benutzer notwendig sind, um eine bestimmte Arbeitsaufgabe mit dem interaktiven System zu erledigen.“

Nutzern lassen sich Schwachstellen identifizieren, welche zur systematischen Optimierung der augmentierten Montageanweisungen und des UIs führen.

Die beschriebenen Vorgehensmodelle liefern erste hilfreiche Informationen zum Entwicklungsprozess von AR-basierten Trainingssystemen. Diese werden bei der Gestaltung des ersten Artefakts (vgl. Abschnitt 2.2), dem Vorgehensmodell, berücksichtigt. Neben diesen Erkenntnissen lassen sich auch zwei Limitationen festhalten, die zur Identifikation der ersten beiden Forschungslücken beitragen:

- Die beiden zuvor beschriebenen Vorgehensmodelle (Abbildung 11, Abbildung 12) verzichten auf konkrete Methodenempfehlungen innerhalb der einzelnen Ablaufphasen. Diese Erkenntnis wird von Wächter [78] untermauert, der in seiner Arbeit verschiedene allgemeine Vorgehensmodelle zur Gestaltung interaktiver Systeme (z.B. Usability Engineering Life Cycle [89]) miteinander vergleicht und zur selben Erkenntnis kommt.
- Im zweiten Vorgehensmodell (Abbildung 12) wird deutlich, dass auf eine Analyse der Nutzeranforderungen verzichtet wird. Lediglich die Erkenntnisse aus der Aufgabenanalyse werden bei der Systemgestaltung berücksichtigt. Bullinger et al. [90] sehen eine fehlende oder mangelhafte Berücksichtigung der Nutzerbedürfnisse kritisch. Demnach sollten potentielle Nutzer frühzeitig in die Entwicklung und Evaluation eines interaktiven Systems mit einbezogen werden. Dadurch können die Funktionalitäten eines Systems konkret auf die Nutzeranforderungen ausgerichtet werden, wodurch gebrauchstaugliche Lösungen entstehen.

3.3.2 Gestaltungsempfehlungen für AR-basierte Trainingssysteme

Die Gestaltung von gebrauchstauglichen AR-basierten Trainingssystemen für manuelle Montagetätigkeiten erfordert die Berücksichtigung von wichtigen Empfehlungen. Durch die strukturierte Literaturrecherche konnten sowohl allgemeine als auch konkrete Richtlinien identifiziert werden, welche in diesem Abschnitt dargelegt sind.

Regenbrecht et al. [91] berichten ihre Erfahrungen aus zehn durchgeführten Projekten in der Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie und geben allgemein gültige Hinweise, die bei der Entwicklung von industriellen AR-Systemen berücksichtigt werden sollen. Demnach werden viele Anwendungen für einfache Demonstrationszwecke entwickelt. Die Menge und Komplexität der dafür verwendeten Daten ist mit realen Daten oft nicht vergleichbar. Daher scheitern viele vermeintlich gute Lösungen, wenn es zum Produktiveinsatz kommt. Reale Daten sollten demnach frühzeitig in die Entwicklung mit einbezogen werden. Neben diesen Einflüssen, die sich aus dem Nutzungskontext ergeben, müssen die Anforderungen potentieller Systemnutzer von Projektbeginn an berücksichtigt werden und in die Gestaltung des Systems mit einfließen. Dafür ist eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Entwicklerteam und den Stakeholdern der Anwendungsdomäne notwendig. Auf Basis der verschiedenen Erkenntnisse und Anforderungen kann ein prototypisches System entwickelt werden, das einfach und pragmatisch gestaltet sein sollte. Dieses muss mit den zukünftigen Nutzern erprobt und systematisch optimiert werden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Akzeptanz für AR-Technologien gesteigert werden kann, wenn die Evaluationen mit einigen wenigen Probanden an einem ausgewählten Arbeitsplatz mit repräsentativer Arbeitsaufgabe durchgeführt werden.

Nachdem das System über mehrere Iterationsschleifen systematisch evaluiert und optimiert wurde, erfolgt dessen Bewertung anhand quantitativer Messgrößen. Dabei muss sich ein deutlicher Mehrwert für die Anwendungsdomäne ergeben, ansonsten sind die Chancen für einen produktiven Einsatz sehr gering.

Die nachfolgende Tabelle 6 fasst die zuvor beschriebenen Empfehlungen zusammen.

Tabelle 6: Allgemeine Empfehlungen für industrielle AR-Systeme.

Quelle: in Anlehnung an Regenbrecht et al. [53]

Nr.	Empfehlungen	Beschreibung
1	Datenintegration	Die frühzeitige Berücksichtigung von realen Daten (z.B. CAD Daten eines Motors) ist essentiell für die erfolgreiche Implementierung eines AR-Systems im industriellen Nutzungskontext.
2	Akzeptanz	Die enge Zusammenarbeit zwischen den Entwicklern eines AR-basierten Systems und verschiedenen Stakeholdern der Anwendungsdomäne ist ausschlaggebend für die Akzeptanz des Systems. Zudem sollten potentielle Nutzer frühzeitig in die Entwicklung mit einbezogen werden, um deren Anforderungen zu berücksichtigen.
3	Einfachheit	Das AR-System sollte einfach gestaltet und auf die praktische Problemlösung ausgerichtet sein.
4	Wertschöpfung	Ein Wirksamkeitsnachweis hinsichtlich quantitativer Messgrößen (z.B. Zeit) ist entscheidend für den Erfolg eines Projekts, denn nur Systeme die einen deutlichen Mehrwert für die Anwendungsdomäne liefern, werden implementiert und produktiv eingesetzt.

Neben den genannten allgemeinen Hinweisen wurden sieben konkrete Empfehlungen identifiziert, welche für die Gestaltung von AR-basierten Montagetrainingssystemen relevant sind. Diese sind in der nachfolgenden Abbildung 14 aufgeführt und resultieren aus den Arbeiten von Webel [92; 93] und Gavish [94].

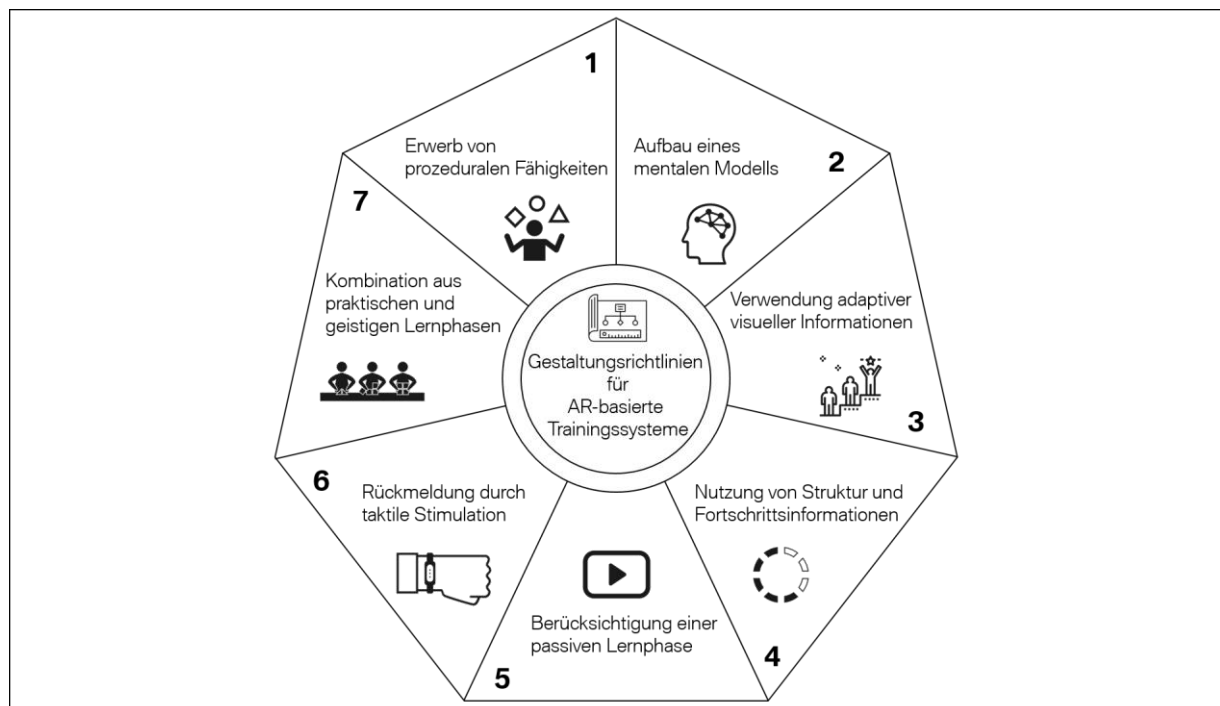


Abbildung 14: Gestaltungsempfehlungen für AR-basierte Trainingssysteme.

Quelle: eigene Darstellung.

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, besteht bei der Verwendung von AR-Leitsystemen eine erhöhte Gefahr, dass Benutzer eine Systemabhängigkeit entwickeln. Infolgedessen sind diese nicht in der Lage, die Montagetätigkeit ohne unterstützendes Assistenzsystem wiederholt auszuführen. Daher wird als erstes empfohlen, ein AR-Trainingssystem so zu gestalten, dass es den Fähigkeitserwerb eines Benutzers während der Montagetätigkeit unterstützt, anstatt diesen lediglich Schritt-für-Schritt anzuleiten. Als wichtigste Fähigkeit erachten Webel et al. [93] die prozedurale Fähigkeit, welche sich aus dem prozeduralen Wissen und dem prozeduralen Gedächtnis zusammensetzt. Das prozedurale Wissen wird auch als Handlungswissen bezeichnet und ermöglicht einer Person die reproduzierbare Ausführung einer zuvor erlernten Tätigkeit in exakter Reihenfolge [95]. Dieses Wissen wird im prozeduralen Gedächtnis abgespeichert und kann bei Bedarf abgerufen werden.

Zweitens wird empfohlen, ein AR-basiertes Trainingssystem so zu gestalten, dass es den Aufbau eines mentalen Modells unterstützt. „Mentale Modelle sind Ausdruck des Verstehens eines Ausschnittes der realen Welt“ [96]. Bezogen auf die manuelle Montage bedeutet diese Definition, dass ein Trainee den Montageprozess versteht, diesen im geistigen Bewusstsein reproduzierbar abspeichert und bei Bedarf abrufen kann. Dabei kann die Bereitstellung von detaillierten strukturellen und ablaufspezifischen Informationen zum Aufbau des mentalen Modells beitragen [97]. Hierbei können visuelle, augmentierte Elemente dienlich sein. Diese werden in den weiteren Empfehlungen näher erläutert.

Als drittes empfehlen Webel et al. [92] die Verwendung von direkten und indirekten visuellen Informationen. Direkte Informationen sind augmentierte Inhalte (z.B. 3D-Daten oder 3D-Animationen), welche mit dem zugehörigen realen Objekt überlagert werden. Im Gegensatz dazu sind indirekte Informationen zugehörige relevante Hinweise für die Durchführung einer bestimmten Montageaufgabe. Dies können Bild-, Video- oder Textinhalte sein. Diese Informationen sollten während des Lernprozesses angepasst werden. Zu Beginn des Lernprozesses können umfangreiche, multimodale Informationen dem Trainee helfen, die zu erlernende Montageprozedur zu verstehen. Mit zunehmendem Qualifikationsniveau (z.B. Anfänger, Fortgeschritten, Experte) sollten die bereitgestellten Informationen reduziert werden. Dieser Gestaltungshinweis deckt sich mit dem Modell zum Erlernen motorischer Fähigkeiten von Fitts und Posner [98]. Demnach werden Fähigkeiten in drei aufeinanderfolgenden Phasen erworben. Die geistige Phase (engl. cognitive stage) zielt zunächst darauf ab, dass der Trainee den gesamten Montageprozess versteht. Eine umfangreiche Informationsbereitstellung ist in dieser ersten Phase essentiell für das Prozessverständnis. Darauf aufbauend erfolgt in der zweiten Phase, der assoziierenden Phase (engl. associative stage), die Übersetzung des deklarativen Wissens in das prozedurale Wissen. Dabei wird das zuvor Erlernte zur praktischen Anwendung gebracht, wodurch die prozeduralen Fähigkeiten gestärkt werden. Bereits in dieser Phase sollten die bereitgestellten Informationen reduziert werden, um eine zu starke Anleitung zu vermeiden. In der letzten Phase, der autonomen Phase (engl. autonomous stage), können unterstützende Informationen nahezu vollständig reduziert werden. Der Trainee ist nun in der Lage, die Montagetätigkeit ohne großen geistigen Aufwand effizient und effektiv durchzuführen.

Als viertes wird empfohlen, Struktur- und Fortschrittsinformationen bei der Softwaregestaltung von AR-basierten Trainingssystemen zu berücksichtigen, da diese zur Akquise der prozeduralen Fähigkeiten bei-

tragen und den Aufbau des mentalen Modells fördern. Ein Beispiel hierfür ist die Nutzung von Fortschrittsanzeigen (engl. progress bar). Durch dieses visuelle Element bekommen Benutzer einen Überblick über deren aktuellen Status in Bezug auf den Gesamtprozess.

Die fünfte Gestaltungsempfehlung verdeutlicht die Bedeutung einer passiven Lernphase am Beispiel eines Vergleichs zwischen einem Navigationssystem und einer Landkarte [92]. Beide Hilfsmittel zielen darauf ab, eine Person zu einem Zielort zu leiten. Durch die starke Anleitung eines Navigationssystems gelangt eine Person schneller zum Zielort, besitzt allerdings weniger Orientierung als eine Person die zur Navigation ausschließlich eine Landkarte oder Hinweisschilder nutzt. Demnach ist die Bereitstellung von Schritt-für-Schritt Informationen vorteilhaft für eine schnelle Durchführung einer initialen Tätigkeit, jedoch nachteilig für den Erwerb prozeduraler Fähigkeiten. Im Gegensatz dazu erfordert die aktive Exploration einer Aufgabe (z.B. mit einer Landkarte) mehr Zeit, allerdings unterstützt sie die Akquise prozeduraler Fähigkeiten [99]. Während der passiven Lernphase wird der Benutzer durch das AR-Trainingssystem mit relevanten Informationen versorgt und ist nicht aktiv mit der Ausführung der zu erlernenden Tätigkeit beschäftigt. Webel et al. [93] präsentieren hierfür ein weiteres visuelles Element, welches den Benutzer durch Videoinhalte die Montageprozedur veranschaulichen soll. Da sich ein einzelner Montageschritt meist aus mehreren Unteraufgaben (engl. sub-tasks) zusammensetzt, empfiehlt es sich, diese zu visualisieren, um den Aufbau des mentalen Modells zu steigern.

Als sechstes ist die Nutzung von Vibrationsarmbändern mit taktiler Stimulation anzuraten. Über die elektrischen Impulse des Armbands erhält der Benutzer eine positive oder negative Rückmeldung bezüglich einer bestimmten Tätigkeit (z.B. Entnahme eines Bauteils). Dadurch können Fehler in frühen Lernphasen vermieden werden. Webel et al. [65] nutzen diese Art der Rückmeldung, um Rotationsrichtungen anzuzeigen. Durch die elektrische Stimulation der Haut erhält der Benutzer eine Rückmeldung, ob ein bestimmtes Bauteil im Uhrzeigersinn oder entgegen dem Uhrzeigersinn verschraubt werden muss.

Siebtens wird empfohlen, die Montagetätigkeit wiederholt auszuführen, um die prozeduralen Fähigkeiten einer Person zu stärken [100]. Dabei sollte die zu erlernende Tätigkeit zum einen praktisch durchgeführt und zum anderen geistig wiedergegeben werden. Diese geistige Wiedergabe kann beispielsweise durch eine verbale Tätigkeitsbeschreibung erfolgen. Hierzu machen Hochmitz und Gavish [101] klar, dass die Kombination aus einer praktischen und geistigen Lernphase die prozeduralen Fähigkeiten einer Person stärkt.

Die beschriebenen Empfehlungen bilden eine gute Grundlage für die Gestaltung und Entwicklung von AR-basierten Montagetrainingssystemen im industriellen Nutzungskontext. Allerdings lässt sich auch folgende Limitation feststellen, die zur Identifikation einer weiteren Forschungslücke beiträgt.

- Die beschriebenen konkreten Empfehlungen (Abbildung 14) sind auf ein einziges wissenschaftliches Projekt, die Dissertation von Webel [102] zurückzuführen. In dieser Arbeit wurden ausschließlich Hand-held Devices untersucht. Daher fehlen konkrete Hinweise für HMD-basierte Anwendungen. Wang et al. [16] bekräftigen dieses Erkenntnis und führen an, dass ungeklärt ist, wie und welche Informationen während eines Montagetrainings unter Nutzung eines HMDs visualisiert werden müssen.

3.3.3 Evaluationen von AR-basierten Trainingssystemen

In diesem Abschnitt werden die identifizierten Evaluationen von AR-basierten Trainingssystemen dargestellt. Dadurch ergeben sich zum einen erste Erkenntnisse zur Erprobung dieser Systeme und zum anderen können aus den identifizierten Limitationen weitere Forschungslücken abgeleitet werden. Durch die strukturierte Literaturanalyse wurden 15 relevante Beiträge gefunden, welche nachfolgend beschrieben sind.

Boud et al. [61] vergleichen in ihrer Studie fünf verschiedene Trainingsmethoden. Die erste Gruppe absolvierte ein Montagetraining mit Hilfe von konventionellen technischen 2D-Zeichnungen. Der zweiten Gruppe wurden die Informationen auf einem PC-Monitor präsentiert, während die dritte Gruppe zusätzlich eine stereoskopische Brille zur Verfügung hatte, um die gezeigten Bilder auf dem Monitor dreidimensional zu begutachten. Die vierte Gruppe verwendete ein immersives VR-HMD und die letzte Gruppe ein AR-HMD. Insgesamt nahmen an dem Experiment 25 Maschinenbau-Studenten teil, welche gleichmäßig in fünf Gruppen aufgeteilt wurden. Alle Probanden waren in der Lage, technische Zeichnungen zu lesen und hatten zuvor keine Erfahrung mit AR oder VR Technologien. Die Aufgabe bestand darin, die Montage einer Wasserpumpe, bestehend aus acht Einzelkomponenten, zu erlernen. Zunächst sollten die Probanden den Aufbau der Wasserpumpe mit dem jeweiligen Trainingsmedium zehn Minuten lang studieren. Im Anschluss daran mussten alle Probanden die Pumpe ohne unterstützendes Hilfsmedium unter zeitlicher Beobachtung montieren. Die Gruppe, welche zuvor mit dem AR-HMD trainierte, absolvierte die Montage im Vergleich zu allen anderen Gruppen am schnellsten. Neben der quantitativen zeitlichen Messung wurden auch qualitative Daten in Form einer Nutzerbefragung erhoben, um die Meinung der Probanden hinsichtlich der Trainingsmedien festzuhalten. Dabei ist festzustellen, dass die Erhebung und Auswertung der Daten unzureichend beschrieben sind und somit keine Reproduzierbarkeit gegeben ist. Darüber hinaus fehlen die Angaben zum Alter und dem Geschlecht der Probanden.

Valimont et al. [103] gehen der Frage nach, ob AR ein praktikables Medium für die Informationsakquise ist. Dabei vergleichen sie die Technologie mit drei weiteren Lernformen (Video, interaktives Video, Papieranleitung). An der Studie nahmen 64 Studenten (56 männlich, 8 weiblich) teil. Diese wurden gleichmäßig in vier Gruppen aufgeteilt. Alle Teilnehmer hatten acht Minuten Zeit, den Aufbau und die Funktion einer Ölpumpe zu erlernen. Zwei Gruppen nutzten dazu ein Video, welches auf einem PC-Bildschirm präsentiert wurde. Eine der beiden Gruppen hatte zusätzlich die Möglichkeit, Informationen zur Pumpe per Mausklick einzublenden bzw. auszublenden. Die dritte Gruppe erhielt neun Fotos mit Informationen zur Ölpumpe. Die AR-Gruppe erhielt augmentierte Informationen über den PC-Bildschirm. Nach einer dreiminütigen Pause wurden die Probanden gebeten, einen Multiple-Choice-Test mit 15 Fragen zum Aufbau und zur Funktion der Pumpe auszufüllen. Der gleiche Test wurde eine Woche später wiederholt, um das Langzeitgedächtnis zu testen. Die AR-Gruppe erzielte in beiden Tests das beste Ergebnis im Vergleich zu allen anderen Gruppen. Eine wesentliche Limitation dieses Experiments ist die fehlende Durchführung einer Montage der Ölpumpe. Darüber hinaus fehlen die Beschreibung der methodischen Vorgehensweise zur Entwicklung und die Evaluation der Gebrauchstauglichkeit des verwendeten Bildschirm-basierten AR-Systems.

Das nahezu identische Experiment wurde von Vincenzi et al. [104] durchgeführt. Der einzige Unterschied bestand darin, dass eine größere Anzahl an Probanden für das Experiment verwendet wurde. Insgesamt absolvierten 96 Studenten den Versuch. Genauere Angaben zum Alter oder Geschlecht der Versuchsteilnehmer wurde nicht gemacht. Die Ergebnisse stimmen mit denen von Valimont et al. [103] überein.

Macchiarella et al. [105] nutzen den gleichen experimentellen Aufbau und die identische methodische Vorgehensweise wie bei den zuvor erläuterten Evaluationen. Anstelle des interaktiven Video-basierten Trainings wird in diesem Experiment ein interaktives AR-System genutzt. In Summe erhalten 24 Probanden augmentierte Informationen zum Aufbau und zur Funktion einer Ölpumpe auf dem PC-Bildschirm, welche sie per Mausklick einblenden bzw. ausblenden können. Weitere 72 Teilnehmer wurden den verbleibenden drei Gruppen (AR, Video, Papieranleitung) zugewiesen. Probanden, die mit dem interaktiven System trainierten, erzielten im Langzeittest das beste Ergebnis. Im Gegensatz dazu erzielte die Gruppe mit dem Video-basierten Training im Kurzzeittest das beste Ergebnis.

Haritos et al. [5] beschreiben ein Experiment in der Luft- und Raumfahrtindustrie, bei dem 36 Studenten die Sicherheitsinspektion eines Flugzeugpropellers erlernen sollen. Hierzu wurden die Probanden gleichmäßig in drei Gruppen aufgeteilt (12 Teilnehmer pro Gruppe). Die erste Gruppe bekam Videoinstruktionen, die zweite Gruppe nutzte eine Papieranleitung und die dritte Gruppe eine HMD-basierte Anwendung. Für das Training hatten die Teilnehmer acht Minuten Zeit. Es folgten eine dreiminütige Pause und anschließend ein Test (Fragebogen) zur Ermittlung des transferierten Wissens durch das jeweilige Trainingsmedium. Den gleichen Test absolvierten die Probanden sieben Tage später. Dadurch sollte das Langzeitgedächtnis der Versuchsteilnehmer überprüft werden. Auf eine Darlegung der Ergebnisse verzichten die Autoren.

In einem weiteren Experiment stellen Pathomaree und Charoenseang [106] ein PC-basiertes AR-System vor. Als Anwendungsfall nutzen sie ein 2D und ein 3D Puzzle, welche einmal ohne und einmal mit Unterstützung durch das AR-System aufgebaut werden sollen. An der Untersuchung nahmen 20 Studenten teil, die in vier gleichmäßig große Gruppen aufgeteilt wurden. Die Gruppen ohne AR-Unterstützung bauten beide Puzzles, nachdem sie diese vorab im finalen Zustand begutachten durften. Die beiden anderen Gruppen bauten beide Puzzles mit AR-Unterstützung einmal auf. Danach wurden diese gebeten den Vorgang zu wiederholen, allerdings ohne die Unterstützung des AR-Systems. Die Ergebnisse zeigen, dass die Gruppe mit AR-System 60% weniger Zeit für das 2D Puzzle und 90% weniger Zeit für das 3D Puzzle benötigt. Darüber hinaus benötigt die Gruppe mit AR-System 84% weniger Schritte, um die Puzzles zusammenzubauen. Die Autoren geben zusätzlich an, dass die Nutzer mit dem System zufrieden waren. Allerdings werden keine Angaben dazu gemacht, mit welchem Fragebogen die Nutzerzufriedenheit erhoben wurde.

Im Rahmen eines europäisch geförderten Projekts entwickelten Gavish et al. [107] ein AR-basiertes System zum Erlernen von Instandhaltungs- und Montagetätigkeiten. Hierbei handelt es sich um ein mobiles Tablet-basiertes Lernsystem. In einer Evaluation vergleichen sie das AR-System mit einem VR-basierten Lernsystem und zwei Kontrollgruppen. Eine Gruppe nutzte das AR-System und führte die Instandhaltungstätigkeit, bestehend aus 25 Schritten, einmal aus. Äquivalent dazu die zugehörige Kontrollgruppe,

allerdings nutzte diese zur Unterstützung ein Video. Die Teilnehmer der VR-Gruppe absolvierten die Tätigkeit zweimal und die VR-Kontrollgruppe sah lediglich ein Video. Die Studie wurde im industriellen Kontext mit 40 Technikern durchgeführt, die gleichmäßig auf die vier genannten Gruppen aufgeteilt wurden. Alle vier Gruppen absolvierten zunächst ein Training. Im Nachgang führten alle Teilnehmer die Tätigkeit ohne Unterstützung erneut aus. Die Ergebnisse des Experiments sind in der nachfolgenden Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Vergleich zwischen AR- und VR-basiertem Training.

Quelle: in Anlehnung an Gavish et al. [107]

Messgrößen	VR-Kontrollgruppe	VR	AR-Kontrollgruppe	AR
Trainingsdauer [s]	266,00	508,50	682,00	851,90
Testdauer [s]	523,50	524,9	517,10	494
Anzahl nicht gelöste Fehler	0,10	0,40	1,30	0,30
Anzahl gelöster Fehler	0,20	0,10	0,30	0,30

Wie die Ergebnisse verdeutlichen, benötigen die Teilnehmer für das Training mit dem AR-System, im Vergleich zu den anderen Gruppen, die längste Zeit. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Techniker während der Durchführung aufgrund des Tablets die Hände nicht frei hatten. Im Gegensatz dazu ist die AR-Gruppe im Test am schnellsten. Im Vergleich zur VR-Gruppe macht die AR-Gruppe weniger Fehler und korrigiert diese häufiger. Die Autoren stellen darüber hinaus die Wichtigkeit der Systemgebrauchstauglichkeit heraus, verzichteten allerdings auf eine Erhebung. In einem späteren Beitrag präsentieren Weibel et al. [65] sowohl das AR-System als auch die Evaluationsergebnisse der AR-Gruppe und der zugehörigen Kontrollgruppe erneut. Die Ergebnisse sind identisch mit den zuvor dargelegten Resultaten von Gavish et al. [107]. Die identische Studie und die Resultate stellen Gavish et al. [12] in einem weiteren Beitrag erneut vor. Zusätzlich präsentieren sie die Ergebnisse einer Nutzerbefragung mit zwei nicht-standardisierten Fragebögen. Hierzu wurden die Probanden der VR- und der AR-Gruppe befragt. Die Benutzer beider Systeme sollten im ersten Fragebogen das Training mit dem jeweiligen System bewerten (z.B. Ich würde das System für das Training von Montage und Instandhaltungstätigkeiten weiterempfehlen). Für die Bewertung der einzelnen Fragen wurde eine fünfstufige Likert-Skala verwendet. Die Ergebnisse des ersten Fragebogens zeigen, dass die Probanden das AR-System gegenüber dem VR-System zum Training bevorzugen würden. Die Gebrauchstauglichkeit beider Systeme wurde mit Hilfe des zweiten Fragebogens erhoben. Dieser enthielt neun Aussagen (z.B. Das System war einfach zu benutzen), welche die Probanden mittels Likert-Skala bewerten mussten. Die Auswertung zeigt, dass die Gebrauchstauglichkeit des AR-Systems höher ist als die des VR-Systems.

Eine Kombination aus AR- und VR-basiertem Training präsentieren Peniche et al. [108]. Als Anwendungsfall diente die Montage einer kleinen Fräsmaschine, bestehend aus sieben Bauteilen. Zur Vorbereitung montierten zunächst alle Teilnehmer die Fräsmaschine einmal. Daraufhin trainierte eine Gruppe die Montage (5 Durchgänge) der Fräsmaschine mit einem VR-System. Im Anschluss daran nutzten die Teilnehmer

ein Bildschirm-basiertes AR-System (3 Durchgänge). Abschließend montierten alle Probanden die Fräsmaschine ohne unterstützendes Assistenzsystem. Eine Vergleichsgruppe absolvierte alle Montagedurchgänge ohne jegliche Unterstützung. Die Zeit jedes Durchgangs wurde gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Montagedauer mit zunehmendem Montagedurchgang abnimmt. Allerdings konnte kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen festgestellt werden. Die Autoren verzichten in ihrem Beitrag auf jegliche Angaben von demografischen Daten. Es ist demnach unklar, wie viele Probanden an dem Experiment teilnahmen, wie alt diese waren und welches Geschlecht sie hatten.

Rohidatun et al. [109] sehen ebenfalls ein hohes Potential in der Kombination aus AR- und VR-basiertem Lernen. Dazu präsentieren sie ein AR- und ein VR-basiertes System zum Erlernen einer Pumpenmontage. Ein experimentelles Versuchsdesign zur Evaluation beider Systeme wird vorgestellt, allerdings wird auf die Durchführung des Experiments verzichtet.

Hou et al. [110] nutzen ein Legomodell als Anwendungsfall und präsentieren in ihrer Studie zwei Experimente. Am ersten Experiment nahmen 50 Studenten teil, die homogen in zwei Gruppen aufgeteilt wurden. Die erste Gruppe verwendete für die Montage des Legomodells ein Monitor-basiertes AR-System. Die zweite Gruppe nutzte eine Papieranleitung mit 3D-Abbildungen. Verglichen wurden die Montagezeit, Montagefehler und die geistige Beanspruchung während der Montage. Die Ergebnisse zeigen, dass die Studenten mit dem AR-System weniger Zeit benötigen, weniger Fehler machen und eine geringere geistige Beanspruchung aufweisen als die Gruppe mit der Papieranleitung. Eine Verkürzung der Montagezeit und eine Reduktion von Montagefehlern konnte auch bereits in anderen Publikationen nachgewiesen werden [111; 112]. In einem zweiten Experiment untersuchten die Autoren den Trainingseffekt beider Lernmedien. Hierzu wurden weitere 30 Studenten (15 pro Gruppe) akquiriert und gleichmäßig aufgeteilt. Zunächst absolvierten beide Gruppen einen Trainingsdurchgang, bei dem sie das Legomodell montieren mussten. Zur Unterstützung verwendeten die Probanden entweder die Papieranleitung oder das AR-System. Nach dem Trainingsdurchgang wurden alle Teilnehmer gebeten, die Montage ohne Unterstützung zu wiederholen. Die Ergebnisse der Erhebung sind in der nachfolgenden Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Vergleich zwischen AR- und Papier-basiertem Lernen.

Quelle: in Anlehnung an Hou et al. [110]

Anzahl der Montagedurchgänge nach dem Training	Gruppe 1 Training mit AR-System		Gruppe 2 Training mit Papieranleitung	
	Montagezeit [min]	Montagefehler	Montagezeit [min]	Montagefehler
1	13,07	3,67	18,60	6,07
2	8,83	1	12,73	3,13
3	7,67	0	9,29	0,86
4	---	---	7,86	0

Die Resultate der Evaluation zeigen, dass die erste Gruppe weniger Fehler macht und weniger Zeit benötigt, um das Legomodell zu montieren als die zweite Gruppe. Im Vergleich zu den Teilnehmern, die für das

Training eine Papieranleitung nutzten, benötigten die Probanden, die zuvor mit dem AR-System trainierten, weniger Durchgänge, um das Modell fehlerfrei zu montieren (3 Durchgänge). Neben der quantitativen Messung wurden qualitative Daten erhoben. Hierzu wurde ein nicht standardisierter Fragebogen verwendet, um die Meinung aller Teilnehmer einzuholen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Nutzer dem verwendeten AR-System positiv gegenüber stehen.

Hou et al. [113] präsentieren einen weiteren Vergleich beider Systeme und nutzen den gleichen Anwendungsfall (Legomodell). Allerdings wird in diesem Experiment der Einfluss des Geschlechts auf den Trainingseffekt untersucht. Hierzu vergleichen sie zwei Gruppen, bestehend aus jeweils sieben männlichen und sieben weiblichen Studenten. Die erste Gruppe absolvierte ein Training unter Nutzung eines PC-basierten AR-Systems. Die zweite Gruppe verwendete eine Papieranleitung mit 3D-Grafiken. Beide Gruppen vollzogen einen Trainingsdurchlauf. Nach einer fünfminütigen Pause wurden alle Probanden gebeten, die Montage erneut ohne Unterstützung durchzuführen. Dabei wurden die Zeit und die Fehler erfasst. Folgende Erkenntnisse liefern die Ergebnisse:

- Mit steigender Anzahl der Montagedurchläufe, sinkt die Anzahl der Fehler und die Montagezeit verkürzt sich.
- Probanden, die mit dem AR-System trainierten, benötigten im Test weniger Zeit für die Montage und machten weniger Fehler als die Gruppe mit der Papieranleitung.
- Nach drei Durchläufen montierte die erste Gruppe fehlerfrei. Im Gegensatz dazu benötigte die zweite Gruppe vier Durchläufe.
- AR-basiertes Training funktioniert für männliche und weibliche Probanden gleichermaßen. Hinsichtlich der Zeit und der Fehler konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.
- Das Training mit einer Papieranleitung funktioniert bei männlichen Probanden besser. Im Vergleich zu den weiblichen Probanden machten diese weniger Fehler und absolvierten die einzelnen Montagedurchgänge schneller.

Westerfield et al. [114] vergleichen in einem Experiment den Einfluss von AR mit Hilfe zwei verschiedener HMD-basierter Anwendungen auf den Wissenstransfer. Als Anwendungsfall nutzen sie die Montage einer PC-Hauptplatine, bestehend aus fünf Komponenten. Der Unterschied zwischen beiden Systemen besteht darin, dass ein System (intelligentes AR-System) dem Benutzer während des Montagetrainings Feedback gibt. So erhält dieser eine Information, ob der Montageschritt korrekt ausgeführt wurde. Im Gegensatz dazu leitet das andere AR-System die Benutzer ohne jegliche Rückmeldung durch die Montagesequenz. An der Studie nahmen 16 Studenten (11 männlich, 5 weiblich) teil, die in zwei gleich große Gruppen aufgeteilt wurden. Das Experiment gliederte sich in zwei Phasen. In der ersten Phase (Training) führten die Teilnehmer mit dem zugewiesenen AR-System die Montage einmal durch. Unmittelbar im Anschluss erfolgte in der zweiten Phase ein Test. Dabei wurden alle Teilnehmer gebeten, die Montage ohne unterstützendes Assistenzsystem zu wiederholen. Probanden, die mit dem intelligenten System trainierten, machten im Test signifikant weniger Fehler als die Gruppe, die das klassische Leitsystem nutzte.

Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass Nutzerfeedback während des Trainings einen Einfluss auf den Wissenstransfer hat. Zur Beurteilung beider Systeme wurden allen Versuchsteilnehmern abschließend zehn nicht standardisierte Fragen gestellt, welche sie mittels einer siebenstufigen Likert-Skala bewerten sollten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Benutzer mit beiden Systemen gleichermaßen zufrieden sind und diese Art des Trainings einem Video oder einem Papier-basierten Training vorziehen würden.

Gonzales-Franco et al. [115] vergleichen in ihrem Beitrag HMD-basiertes Training mit konventionellen Trainer-basiertem Training. Als Anwendungsszenario dient die Instandhaltungstätigkeit einer Flugzeugtür. An dem Experiment nahmen 24 Probanden (21 männlich, 3 weiblich) teil, die in zwei gleich große Gruppen aufgeteilt wurden. Beide Gruppen beobachteten den Trainer während der Ausführung und der Erläuterung der Tätigkeit, mit dem Ziel sich so viel wie möglich einzuprägen. Zusätzlich nutzten der Trainer und die Trainees der zweiten Gruppe ein VST-HMD. In diesem kollaborierenden Szenario können neben den akustischen Informationen (Erklärungen des Trainers) auch augmentierte Inhalte präsentiert werden. Im Anschluss an das Training erfolgte zunächst ein Wissenstest in Form eines Multiple-Choice-Tests. Danach wurden die Versuchsteilnehmer beider Gruppen gebeten, die zuvor erlernte Tätigkeit ohne Unterstützung durchzuführen. In beiden Tests konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Demnach eignen sich beide Anlernmethoden für das Training von Montage- und Instandhaltungstätigkeiten.

In der nachfolgenden Tabelle 9 werden die zuvor beschriebenen Beiträge anhand verschiedener Kriterien eingeordnet und miteinander verglichen. Daraus ergeben sich wichtige Erkenntnisse und weitere Forschungspotentiale.

Tabelle 9: Auswertung der Evaluationen AR-basierter Trainingssysteme.

Quelle: eigene Darstellung.

Literaturquelle	AR Ausgabegeräte			Probandeninformationen				Messgrößen				Kontext	
	Tablet, Handy, Monitor	Head-Mounted Display	Projektor	Studenten	Reale Probanden (z.B. Montagearbeiter)	Probandenanzahl je Gruppe	Durchschnittliches Alter der Probanden	Effizienz -Zeit-	Effektivität -Montagefehler-	Wissensfragebogen	Nicht standardisierter Fragebogen zur Nutzerzufriedenheit	Industrieller Nutzungskontext	Laborumfeld
Boud et al. [61]	○	●	○	●	○	5	○	●	○	○	●	○	●
Valimont et al. [103]	●	○	○	●	○	16	○	○	○	●	○	○	●
Vincenzi et al. [104]	●	○	○	●	○	24	○	○	○	●	○	○	●
Macchiarella et al. [105]	●	○	○	●	○	24	○	○	○	●	○	○	●
Haritos et al. [5]	○	●	○	●	○	12	○	○	○	○	○	●	○
Pathomaree et al. [106]	●	○	○	●	○	5	○	●	○	○	●	○	●

Gavish et al. [107]	●	○	○	○	●	10	33,2	●	●	○	○	●	○
Webel et al. [65]	●	○	○	○	●	10	33,2	●	●	○	○	●	○
Gavish et al. [12]	●	○	○	○	●	10	33,2	●	●	○	●	●	○
Peniche et al. [108]	●	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	●
Rohidatun et al. [109]	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●
Hou et al. [110]	●	○	○	●	○	15	○	●	●	○	●	○	●
Hou et al. [113]	●	○	○	●	○	14	○	●	●	○	○	○	●
Westerfield et al. [114]	○	●	○	●	○	8	○	●	●	○	●	○	●
Gonzalez et al. [115]	○	●	○	●	○	12	32,5	●	●	●	○	●	○
<div> <div>Bedingung erfüllt</div> <div>Bedingung teilweise erfüllt</div> <div>Bedingung nicht erfüllt</div> </div>													
<div> <div>Legende</div> <div>●</div> <div>●</div> <div>○</div> </div>													

Aus der Literaturanalyse wird ersichtlich, dass vorrangig Tablet- bzw. Bildschirm-basierte AR-Systeme verwendet werden. Ein Mangel besteht im Bereich projektionsbasierter Trainingssysteme. Im Gegensatz dazu ist das Forschungsfeld projektionsbasierter Leitsysteme für die manuelle Montage weitestgehend erforscht. Funk [116] präsentiert in seiner Doktorarbeit verschiedene projektionsbasierte Assistenzsysteme und evaluiert deren Nützlichkeit mit verschiedenen Nutzergruppen (z.B. leistungsgewandelte Personen) am Beispiel der Kommissionierung und der manuellen Montage. Darüber hinaus geht aus der Auswertung der Literatur folgende Limitation hervor:

- Neben den fehlenden Untersuchungen projektionsbasierter Trainingssysteme, werden in nur vier Beiträgen HMDs für Evaluationen genutzt. Diese sind zum einen VST-basierte Eigenentwicklungen im Prototypstatus [115] oder veraltete OST-HMDs. Eine erneute Durchführung der Experimente mit derzeit verfügbaren HMDs liefert mit hoher Wahrscheinlichkeit bessere Ergebnisse, da sich die Technologie weiterentwickelt hat.

Neben der Art des Ausgabegeräts wurden die Informationen der Probanden analysiert. Folgende Limitationen ergeben sich aus der Analyse der beschriebenen Beiträge:

- Es zeigt sich, dass vorrangig männliche Studenten an den Experimenten teilnehmen. Diese haben meist keine Erfahrung mit Montagetätigkeiten und stellen nicht die Zielgruppe AR-basierter Montage-Assistenzsysteme dar. Lediglich ein Experiment wurde mit realen Nutzern durchgeführt [107]. Die Ergebnisse dieser Studie wurden in zwei weiteren Beiträgen wiederholt veröffentlicht [12; 65].
- Die Beiträge beschränken ihre Betrachtung auf summative Evaluationen (vgl. Abschnitt 3.3.1) mit einem between-subject Versuchsdesign. Dabei werden verschiedene Trainingsunterstützungen (z.B. Papieranleitung, Video, HMD) miteinander verglichen. Die Versuchsteilnehmer werden gleich-

mäßig aufgeteilt und einer Gruppe zugeordnet. Die Auswertung der Literatur zeigt, dass sich durchschnittlich 12,7 Teilnehmer in einer Gruppe befinden. Zwei Publikationen machen keine Angaben zur Anzahl der Probanden. Darüber hinaus verzichteten viele Beiträge auf die Angabe demografischer Daten (z.B. Alter, Geschlecht).

Generell gliedern sich die Experimente der identifizierten Beiträge in zwei Phasen. In der ersten Phase absolvieren die Probanden zunächst ein Training mit einem zugewiesenen Trainingsmedium. Währenddessen müssen sie sich so viel wie möglich einprägen (z.B. die Montagereihenfolge). In der zweiten Phase wird das Wissen der Probanden abgefragt. Hierzu werden alle Teilnehmer entweder gebeten, die erlernte Prozedur ohne Unterstützung zu wiederholen oder einen Multiple-Choice Wissenstest auszufüllen. Dabei werden verschiedene Messgrößen ermittelt. Hierzu liefert die Analyse der Beiträge folgende Limitationen:

- Die Effizienz (Zeit) und Effektivität (Montagefehler) wird am häufigsten erhoben. In vier Publikationen wird ein Wissenstest verwendet, allerdings verzichten drei Beiträge auf die Angabe der verwendeten Fragen. Dadurch ist die Reproduzierbarkeit der Versuche nicht gegeben. Darüber hinaus verzichten zwei Veröffentlichungen auf die Angabe von Evaluationsergebnissen.
- Neben den pragmatischen Messgrößen zur Bewertung der Nützlichkeit eines Trainingssystems werden in 5 Publikationen nichtstandardisierte Fragebögen zur Ermittlung der Nutzerzufriedenheit verwendet. Nur zwei Beiträge machen Angaben zu den verwendeten Fragen. Demnach fehlen Experimente zur Erhebung der Gebrauchstauglichkeit AR-basierter Trainingssysteme mit standardisierter iterativer Vorgehensweise und die Beschreibung der verwendeten Methoden. Langley et al. [117] bekräftigen dieses Erkenntnis und zeigen auf, dass die Gebrauchstauglichkeit vorrangig bei VR-basierten Trainingssystemen erhoben wird. Im Gegensatz dazu fehlen Untersuchungen im Bereich AR-basierter Trainingssysteme. Diese iterativen Evaluationszyklen sind allerdings notwendig, um gebrauchstaugliche Lösungen zu gestalten.

Die letzte Erkenntnis, die aus der Analyse der Beiträge hervorgeht, ist, dass die Evaluationen hauptsächlich im Laborkontext durchgeführt wurden. Daraus ergeben sich folgende Limitationen:

- Den Studien fehlt es an externer Validität, da die Umgebungsbedingungen der Versuche mit denen einer industriellen Produktion nicht vergleichbar sind. Hier können laute Umgebungsgeräusche von Produktionsanlagen oder Schmutz die Benutzung des AR-Systems beeinflussen.
- Neben dem Nutzungskontext ist auch der Anwendungsfall entscheidend für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf industrielle Anwendungsfälle. Diese ist bei den beschriebenen Studien nicht gegeben, da AR-Trainingssysteme vorrangig am Beispiel von Montageaufgaben mit geringer Komplexität erprobt werden (z.B. Lego-Anwendungen). Im Vergleich dazu sind industrielle Montageprozesse (z.B. Motormontage) viel komplexer. Neben der Reihenfolge muss ein Montagearbeiter wissen, welches Bauteil, welche zugehörigen Schrauben und welches Werkzeug er für einen spezifischen Schritt benötigt. Darüber hinaus sollte er die korrekte Verbauposition jedes Bauteils kennen.

3.3.4 Zusammenfassung der finalen Datenbasis

Im Abschnitt 3.3 wurden die relevantesten Beiträge für das Forschungsfeld dieser Dissertation dargelegt. Hieraus resultieren wichtige Erkenntnisse zum Entwicklungsvorgehen, zur Gestaltung und Evaluation von AR-basierten Trainingssystemen für manuelle Montagetätigkeiten im industriellen Nutzungskontext. Darüber hinaus konnten durch die Analyse der Beiträge verschiedene Forschungslücken identifiziert werden. Sie bilden die Ausgangsbasis für die gestaltungsorientierte Forschung (vgl. Abbildung 8) und begründen die Notwendigkeit der vorliegenden Dissertation.

Aus den gesammelten Erkenntnissen der dargelegten wissenschaftlichen Beiträge und den identifizierten Forschungslücken lassen sich schließlich die drei nachfolgenden Forderungen ableiten:

- Die Wissenschaft fordert ein reproduzierbares Vorgehensmodell zur Gestaltung und Evaluation von AR-basierten Trainingssystemen für manuelle Montagetätigkeiten, das die Nutzeranforderungen über die gesamte Entwicklung hinweg berücksichtigt und seine Anwendbarkeit durch eindeutige Methodenempfehlungen in allen Phasen sicherstellt.
- Die Wissenschaft fordert die Erarbeitung von konkreten Gestaltungsempfehlungen für HMD-basierte Trainingsanwendungen. Dabei liegt der Fokus im speziellen auf der Visualisierung von augmentierten Inhalten.
- Die Wissenschaft fordert formative und summative Evaluationen von HMD-basierten Trainingsanwendungen im industriellen Nutzungskontext. Dabei sollten die Erprobungen am Beispiel repräsentativer Arbeitsaufgaben mit potentiellen Nutzern erfolgen und ausreichend detailliert beschrieben sein, um die Wiederholbarkeit der Versuche zu gewährleisten.

Die identifizierten Forschungslücken und abgeleiteten Anforderungen sind in der Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Forschungslücken und abgeleitete Bedarfe aus der Wissenschaft.

Quelle: eigene Darstellung.

Kategorisierung der A-Literatur			
	Vorgehensmodell	Gestaltung	Evaluation
Forschungslücken	Fehlende Methodenempfehlungen	Fehlende Gestaltungsempfehlungen für HMD-basierte Anwendungen	Fehlende Evaluationen von HMD-basierten Anwendungen
	Fehlende Berücksichtigung der Nutzerbedürfnisse	---	Fehlende oder unzureichende Beschreibung der Studien
	---	---	Fehlende Untersuchungen im industriellen Nutzungskontext
	---	---	---
Bedarfe	Reproduzierbares, menschenzentriertes Vorgehensmodell	Gestaltungsempfehlungen für HMD-basierte Anwendungen	Evaluationen von HMD-basierten Trainingsanwendungen im industriellen Nutzungskontext

3.4 Anforderungen der Anwendungsdomäne

Neben den genannten Forderungen, welche aus der bestehenden Literatur resultieren, müssen praxisrelevante Anforderungen erhoben werden, um den Prinzipien der gestaltungsorientierten Forschung gerecht zu werden (vgl. Abbildung 8). Dieser Erhebung widmen sich die nachfolgenden Abschnitte. Hierzu wird zunächst das Versuchsdesign dargelegt. Es folgt eine Erläuterung des konkreten Versuchsablaufs, gefolgt von einer Beschreibung der Probanden und der Vorstellung der Ergebnisse. Diese werden zum Abschluss dieses Abschnitts diskutiert und zusammengefasst.

3.4.1 Versuchsdesign

Eine Fokusgruppen-Diskussion wird verwendet, um die Anforderungen von drei Interessensgruppen der Anwendungsdomäne zu ermitteln. Diese Methode eignet sich hervorragend für das genannte Untersuchungsziel, da gruppendynamische Effekte „das Engagement und die Auskunftsbereitschaft der Teilnehmer positiv beeinflussen“ [118]. Im Gegensatz zu Einzelinterviews entsteht eine natürliche Gesprächssituation, wodurch umfassendere Informationen mit Konsens gesammelt werden können [119]. Für die Untersuchung wird ein between-subject Design verwendet. Als unabhängige Variable wird die Jobposition definiert. Die Anforderungen der jeweiligen Gruppen stellen die abhängige Variable dar.

3.4.2 Versuchsteilnehmer

An der Erhebung nehmen insgesamt 15 Personen teil (13 männlich, 2 weiblich). Diese werden in Abhängigkeit ihrer Jobposition in drei gleichgroße Gruppen aufgeteilt und haben keine Erfahrung mit AR-Technologien. Die erste Gruppe besteht aus fünf männlichen Montagearbeitern ($M=43,2$ Jahre alt; $SD=9,94$). Sie sind bei der BMW Group in München beschäftigt und arbeiten bereits mehrere Jahre in einer taktgebunden Fließband-Motormontage. Die zweite Gruppe besteht aus fünf männlichen Managern ($M=48,4$ Jahre alt, $SD=4,3$), die im Innovationsbereich tätig sind. Sie entscheiden über die Durchführung eines Vorentwicklungsprojekts und stellen die dafür benötigten finanziellen Mittel bereit. Die dritte Gruppe besteht aus zwei weiblichen und drei männlichen Betriebsräten ($M=52$ Jahre alt, $SD=3,34$). Diese setzen sich für die Rechte der Angestellten eines Unternehmens (z.B. Montagearbeiter) ein. Alle Versuchsteilnehmer sind für diese Fokusgruppen-Diskussion relevant, da sie einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Gestaltung und Entwicklung des AR-basierten Trainingssystems haben.

3.4.3 Versuchsablauf

Die Vorbereitung der Fokusgruppen-Diskussion beginnt mit der Einladung der Versuchsteilnehmer per Email und der Reservierung von Besprechungsräumen. Um Wegezeiten zu sparen und den Probanden die Anreise zu erleichtern, werden Räume genutzt, die eine örtliche Nähe zu den Arbeitsplätzen der Personen haben. Für die Gruppendiskussion werden drei Termine an unterschiedlichen Tagen und Orten vereinbart. Die maximale Versuchsdauer wird auf drei Stunden festgelegt. Vor Beginn der Diskussion werden den Probanden die Grundlagen der erweiterten Realität (AR) erläutert. Hierzu verwendet der Moderator klassische Präsentationsfolien und Videos, welche über einen Projektor auf einer Leinwand dargestellt werden. Darüber hinaus bekommt jeder Proband die Möglichkeit, ein HMD (Microsoft HoloLens) mit verschiedenen Beispielanwendungen für rund zehn Minuten zu testen [120]. Nachdem alle Personen das

System ausgiebig getestet haben, startet die eigentliche Diskussion. Zu Beginn erläutert der Moderator zunächst die Zielsetzung, welche sich aus der ersten Forschungsfrage dieser Dissertation ergibt (Abschnitt 1.2). Demnach gilt es herauszufinden, welche Anforderungen die drei Gruppen an die Gestaltung und Entwicklung AR-basierter Montagetrainingssysteme stellen. Hierzu werden die folgenden drei Fragen verwendet, die sich aus den identifizierten Forschungslücken ergeben (vgl. Abschnitt 3.3.4):

1. Was sollte beim Entwicklungsvorgehen von AR-basierten Trainingssystemen beachtet werden?
2. Was sollte bei der Gestaltung von AR-basierten Trainingssystemen beachtet werden?
3. Was sollte bei der Evaluation von AR-basierten Trainingssystemen beachtet werden?

Nachdem das Ziel der Diskussion jedem Teilnehmer bekannt ist, erörtert jede Gruppe unter Leitung des Moderators die genannten drei Fragen. Während der Diskussion hält ein Protokollant die wichtigsten Aussagen der Probanden schriftlich fest. Direkt im Anschluss an die Diskussionsrunde, werten der Moderator und der Protokollant das Gesprächsprotokoll aus. Dazu werden die Aussagen der Versuchsteilnehmer analysiert und gruppiert, woraus sich die Anforderungen an das Entwicklungsvorgehen, an die Gestaltung und an die Evaluation des AR-basierten Montagetrainingssystems ergeben.

3.4.4 Ergebnisse der Fokusgruppen-Diskussion

Aus den drei Fokusgruppen-Diskussionen konnten verschiedene Anforderungen identifiziert werden. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle 11 in Bezug auf die Fragestellungen aufgeführt.

Tabelle 11: Anforderungen der Anwendungsdomäne.

Quelle: eigene Darstellung.

Anforderungen der Anwendungsdomäne			
Gruppen	Frage 1 Vorgehensmodell	Frage 2 Gestaltung	Frage 3 Evaluation
Gruppe 1- Montagearbeiter	Berücksichtigung der Nutzerbedürfnisse	Multimodale Informationsbereitstellung	Erprobung außerhalb der Produktionslinie
Gruppe 2- Manager	Ressourcenschonender Entwicklungsprozess Dokumentierte Vorgehensweise	Ressourcenschonende Software- und Hardwaregestaltung	Darlegung eines Wirksamkeitsnachweises
Gruppe 3- Betriebsrat	Regelmäßige Abstimmung	Kabelloses OST-HMD	Erfassung der Nutzermeinungen Erfassung der Beanspruchung

Die Teilnehmer der ersten Gruppe äußerten, dass „neue interaktive Werkerassistenzsysteme und innovative Lösungen häufig ohne Berücksichtigung [unserer] Bedürfnisse gestaltet werden“. Dadurch besitzen viele Systeme eine mangelnde Gebrauchstauglichkeit, was bei den Nutzern zu einer fehlenden Akzeptanz

führt. Die erste Gruppe fordert daher ein Vorgehensmodell, bei dem ihre Wünsche und Bedürfnisse berücksichtigt werden. Die zweite Gruppe ergänzt diese Forderung und verlangt eine minimale zeitliche Bindung der Montagearbeiter bei der Entwicklung, da diese in die Fließbandproduktion eingebunden sind und ihrer eigentlichen Tätigkeit nachgehen sollen. Darüber hinaus soll das Vorgehen zur Entwicklung des AR-basierten Trainingssystems in allen Phasen dokumentiert werden und einfach anzuwendende standardisierte Methoden enthalten. Somit kann der Entwicklungsprozess unabhängig vom Anwender beliebig oft wiederholt werden. Zusätzlich gewährleistet eine detaillierte Dokumentation, dass wichtige Informationen nicht verloren gehen und eine kontinuierliche Prozessverbesserung stattfinden kann. Die dritte Gruppe fordert eine regelmäßige Abstimmung um sicher zu stellen, dass Methoden anonymisiert verwendet werden.

In Bezug auf die Gestaltung des AR-basierten Trainingssystems äußerte die erste Gruppe, dass „die Möglichkeiten der Technologie ausgeschöpft werden sollen“. Demnach soll durch die Bereitstellung von multimodalen Informationen das Training der Montagefähigkeiten unterstützt werden. Dabei soll die Gestaltung gemäß den Aussagen der zweiten Gruppe ressourcenschonend erfolgen. Dies erfordert eine kostengünstige Softwareentwicklung und die Auswahl einer preisgünstigen Hardware. Ergänzend dazu verlangt die dritte Gruppe, ein kabelloses OST-HMD als Anzeigegerät zu verwenden. Die Betriebsräte schließen kabelbasierte und VST-HMDs aus, da diese „ein erhöhtes Sicherheitsrisiko in der manuellen Montage darstellen“. Durch ein Kabel, welches mit einem stationären PC verbunden ist und meist über den Boden gelegt wird, besteht Stolpergefahr. Zudem wird das Sichtfeld der Benutzer durch ein VST-HMD eingeschränkt.

Aus den Antworten der dritten Frage geht hervor, dass die Montagearbeiter eine Systemerprobung außerhalb der Produktionslinie an einem äquivalenten Arbeitsplatz wünschen. Dies begründen die Teilnehmer der ersten Gruppe durch folgende Äußerungen: „Das Erlernen neuer Montagefähigkeiten sowie die Bedienung eines AR-basierten Trainingssystems erfordern eine gewisse Eingewöhnungszeit“. Daher würde „eine Erprobung des Systems in der taktgebundenen Fließbandproduktion höchstwahrscheinlich zu Störungen im Produktionsablauf führen“. Die zweite Gruppe ist daran interessiert, neue Technologien einzusetzen, um bestehende Prozesse effektiver und effizienter zu gestalten. Daher fordern die Manager, das AR-basierte Trainingssystem einem Wirksamkeitsnachweis zu unterziehen, um dessen Nützlichkeit darzulegen. Eine vergleichende Evaluation mit bestehenden Anlernmethoden am Beispiel eines realen Anwendungsfalls soll Aufschluss darüber geben. Neben dieser Messung zur Effektivität und Effizienz des Trainingssystems verlangt die dritte Gruppe eine Erfassung der Nutzermeinungen. Darüber hinaus äußern die Betriebsräte, dass „die Benutzer während der Ausführung ihrer Tätigkeit durch das AR-basierte Trainingssystem nicht beeinträchtigt werden dürfen“. Um dies zu bewerten, soll die subjektiv wahrgenommene Beanspruchung während des Trainings ermittelt werden.

3.4.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Fokusgruppen-Diskussion mit den Montagearbeitern liefern wichtige Erkenntnisse für die Gestaltung der Artefakte dieser Dissertation (vgl. Abschnitt 2.2). Dabei stimmen die aus den verschriftlichten Verbalisierungen abgeleiteten Anforderungen teilweise mit den Erkenntnissen aus der strukturierten Literaturrecherche überein. Demnach fordern sowohl die Wissenschaft als auch die Praxis eine Berücksichtigung der Nutzerbedürfnisse bei der Gestaltung und Entwicklung eines AR-basierten Trainingssystems. Außerdem verlangt die Praxis, multimodale Informationen zu verwenden, um das volle Potential der Technologie auszuschöpfen und verschiedene Nutzer anzusprechen. Diese Anforderung stimmt mit einer Gestaltungsempfehlung überein, welche durch die strukturierte Literaturanalyse identifiziert wurde (Empfehlung 3, Abbildung 14). Der Wunsch der Montagearbeiter, das interaktive System außerhalb der taktgebunden Produktion zu erproben, stimmt mit der Empfehlung von Regenbrecht et al. [91] überein. Demnach sollte eine „Trainingsinsel“ verwendet werden, um ein AR-System zu evaluieren. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, sollte der Aufbau eines solchen Arbeitsplatzes äquivalent zur Produktionsumgebung sein. Dadurch können die Benutzer das System an einem ausgewählten Anwendungsbeispiel ausgiebig testen, wodurch die Benutzerakzeptanz gesteigert wird.

Die Anforderungen der zweiten Gruppe ergänzen die im Abschnitt 3.3.4 identifizierten Forschungslücken. Demzufolge fordern die Wissenschaft und die Praxis ein Vorgehen zur Gestaltung und Entwicklung von AR-basierten Trainingssystemen, das die Gütekriterien empirischer Forschung erfüllt [21]:

- **Objektivität:** Die Ergebnisse, welche sich durch die Anwendung der Methoden des Vorgehensmodells ergeben, sind unabhängig vom Anwender.
- **Reliabilität:** Die wiederholte Anwendung der Methoden des Vorgehensmodells führt zum gleichen Ergebnis.
- **Validität:** Die Methoden des Vorgehensmodells sind auf das Untersuchungsziel ausgerichtet und messen genau das, was sie messen sollen.

Um die genannten Gütekriterien zu erfüllen, müssen die einzelnen Schritte und Methoden des Vorgehensmodells ausreichend detailliert beschrieben sein. Zusätzlich fordern die Teilnehmer der zweiten Fokusgruppe, ressourcenschonende Methoden zu verwenden. Dies bedingt die Selektion geeigneter Methoden, welche mit wenigen Personen und geringem zeitlichen Aufwand vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet werden können. Neben der Methodenauswahl soll auch die Softwaregestaltung und Hardwareauswahl kostengünstig sein. Die Forderung der zweiten Gruppe, einen quantitativen Wirksamkeitsnachweis zu liefern, stimmt mit der Empfehlung von Regenbrecht et al. [91] überein (vgl. Tabelle 6). Demnach wird ein AR-System nur dann produktiv eingesetzt, wenn dessen Mehrwert für die Anwendungsdomäne quantitativ belegt ist. Dieser Nachweis bietet zusätzlich einen wissenschaftlichen Mehrwert, denn derzeit besteht ein Mangel an Evaluationen von HMD-basierten Trainingsanwendungen in der Literatur (vgl. Tabelle 9).

Aus den Ergebnissen der dritten Fokusgruppe resultieren ergänzende Anforderungen zum Entwicklungsvorgehen, zur Gestaltung und zur Evaluation von AR-basierten Trainingssystemen. Die Teilnehmer fordern die Verwendung von kabellosen OST-HMDs, da die Nutzung von VST-HMDs ein erhöhtes Sicherheitsrisiko in der manuellen Montage darstellt. Diese Einschätzung geht auch aus wissenschaftlichen Beiträgen hervor [72]. Im Gegensatz zur zweiten Fokusgruppe, die einen quantitativen Wirksamkeitsnachweis des Systems fordert, wünscht sich die dritte Fokusgruppe Informationen zu Nutzermeinungen und ergonomischen Aspekten des Systems. Eine Erhebung dieser Daten erfüllt die Anforderung der Betriebsräte und liefert zugleich einen wissenschaftlichen Mehrwert, da hier eine Forschungslücke besteht (vgl. Abschnitt 3.3.4).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Fokusgruppen-Diskussion eine geeignete Methode darstellt, um die Anforderungen, Wünsche und Bedürfnisse von verschiedenen Interessengruppen gegenüber dem Entwicklungsvorgehen, der Gestaltung und Evaluation von AR-basierten Trainingssystemen zu erheben. Allerdings hat sich gezeigt, dass die Durchführung mit taktgebundenen Montagearbeitern schwierig ist. Die gesamte Gruppe musste für die Dauer der Diskussion von sogenannten Springern (Reservepersonal) ersetzt werden. Das sind hochqualifizierte Personen, die in der Lage sind, verschiedenste Tätigkeiten an unterschiedlichen Arbeitsplätzen auszuführen. Sie kommen immer dann zum Einsatz, wenn das Stammpersonal fehlt [121]. Durch den Einsatz dieser Springer können hohe Personalkosten entstehen. Demnach empfiehlt es sich, eine Fokusgruppen-Diskussion mit Montagearbeitern außerhalb der eigentlichen Arbeitszeit oder während einer geplanten Produktionsunterbrechung durchzuführen, sofern das vom Arbeitgeber gestattet wird. Eine Alternative zu Gruppendiskussionen können auch Einzelinterviews sein. Dabei muss lediglich immer nur eine Person des Stammpersonals durch einen Springer ersetzt werden.

3.5 Zusammenfassung des Kapitels

Das Kapitel beschäftigte sich mit der Erarbeitung der Wissensbasis für die vorliegende Dissertation. Dazu erfolgte zunächst die Einordnung und Abgrenzung des Forschungsgebiets. Auf dieser Grundlage wurde eine strukturierte Literaturrecherche unter Verwendung ausgewählter Suchbegriffe in geeigneten wissenschaftlichen Onlinedatenbanken durchgeführt. Im Montagekontext konnten 136 relevante Publikationen identifiziert werden, welche in Abhängigkeit ihrer Gesamtrelevanz kategorisiert wurden. Die nähere Analyse der relevantesten Beiträge im Forschungsfeld dieser Arbeit lieferte diverse Forschungslücken. Demnach besteht ein Mangel an menschenzentrierten Vorgehensmodellen zur Gestaltung AR-basierter Trainingssysteme, welche ihre reproduzierbare Anwendung durch eindeutige Methodenempfehlungen gewährleisten. Zusätzlich dazu fehlen Gestaltungsempfehlungen, insbesondere für HMD-basierte Trainingsanwendungen. Wang et al. [16] bestätigen diese Erkenntnis und führen zudem an, dass sich die bestehenden Gestaltungsempfehlungen auf ein einziges Projekt von Webel und Gavish zurückführen lassen. Neben den bereits genannten Forschungslücken mangelt es an umfangreichen Evaluationen im industriellen Nutzungskontext. Im Zuge dessen zeigen Billingham et al. [122] auf, dass nicht bekannt ist, wie Evaluationen von AR-basierten Systemen vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet werden müssen. Darüber hinaus legen Dey et al. [123] dar, dass Usability-Studien im industriellen Kontext fehlen und vor-

wiegend im Laborkontext mit Studenten ohne Montageerfahrung durchgeführt werden. Auf Basis der genannten Einschränkungen wurden verschiedene Anforderungen aus der Wissenschaft abgeleitet, mit dem Ziel die bestehenden Forschungslücken zu schließen. Ergänzend dazu lieferten drei Fokusgruppen-Diskussionen praxisrelevante Bedarfe. Zusammenfassend geben die Anforderungen der Wissenschaft und der Praxis eine Antwort auf die erste Forschungsfrage:

Welche Anforderungen werden an die Gestaltung von gebrauchstauglichen AR-basierten Trainingssystemen in der manuellen Montage gestellt?

Mit Bezug auf den Forschungsrahmen dieser Dissertation führen die identifizierten Forschungslücken zur Wahrnehmung des Problems. Die erarbeiteten Anforderungen aus der Wissenschaft und der Praxis geben einen ersten Vorschlag zur Lösung dieser Forschungslücken. Dadurch lässt sich zusammenfassend festhalten, dass der erste und zweite Prozessschritt der gestaltungsorientierten Forschung erfolgreich abgeschlossen wurde (vgl. Abbildung 8). Basierend darauf, erfolgt die Gestaltung des ersten Artefakts (Vorgehensmodell) im nachfolgenden Kapitel 4.

4 Erarbeitung des Vorgehensmodells

„The best kind of design isn't necessarily an object, a space or a structure: it's a process – dynamic and adaptable.”

Don Norman, Professor

Auf Basis der Erkenntnisse und den Anforderungen aus der Literatur und der Praxis (vgl. Abschnitt 3.5) wird in diesem Kapitel ein Vorgehensmodell zur Gestaltung AR-basierter Trainingssysteme für manuelle Montagetätigkeiten erarbeitet. Dieses orientiert sich am Vorgehen der menschenzentrierten Gestaltung von interaktiven Systemen. Hierzu werden zunächst die Grundlagen erläutert. Es folgt eine Beschreibung der einzelnen Phasen des iterativen Gestaltungsprozesses. Dieser beginnt mit der Analyse des Nutzungskontexts und einer Spezifizierung der Anforderungen der Benutzer. Hierfür werden verschiedene Methoden vorgestellt, diskutiert und auf Basis der Anforderungen der Anwendungsdomäne (vgl. Abschnitt 3.4) zu einer Analysemethodik zusammengefasst. Darauf aufbauend werden die Grundlagen für die Gestaltung des interaktiven Trainingssystems geschaffen. Dieses besteht aus einem geeigneten HMD zur Visualisierung von augmentierten Informationen für manuelle Montageanwendungen und einer Trainingssoftware mit verschiedenen Funktionalitäten. Die Auswahl des HMDs erfolgt auf Basis der Forderung der Anwendungsdomäne (vgl. Tabelle 11) und Empfehlungen aus der bestehenden Literatur. Für die Gestaltung der Softwarefunktionalitäten sollten neben den Empfehlungen aus der strukturierten Literaturrecherche (vgl. Abschnitt 3.3.2) weitere Grundsätze beachtet werden. Die Wesentlichen werden in diesem Kapitel beschrieben. Im Anschluss daran werden verschiedene Methoden zur Evaluation des AR-basierten Trainingssystems vorgestellt. Diese werden auf Grundlage der erhobenen Praxisanforderungen, den Erkenntnissen und Anforderungen aus der Literatur zu einer Evaluationsmethodik zusammengefasst und runden das Vorgehensmodell ab.

4.1 Menschzentrierte Gestaltung

Wie im Abschnitt 3.5 dargelegt, fordern die Literatur und die Praxis ein Vorgehensmodell, bei dem die Wünsche und Bedürfnisse potentieller Systemnutzer im Zentrum des Entwicklungsvorgehens stehen. Ein solches Vorgehen liefert die DIN EN ISO 9241-210:2010 und definiert es als menschenzentrierte Gestaltung. Dies ist eine „Herangehensweise bei der Gestaltung und Entwicklung von Systemen, die darauf abzielt, interaktive Systeme gebrauchstauglicher zu machen, indem sie sich auf die Verwendung des Systems konzentriert und Kenntnisse und Techniken aus den Bereichen der Arbeitswissenschaft/Ergonomie und der Gebrauchstauglichkeit anwendet“ [20]. Der Entwicklungsprozess gliedert sich in vier aufeinanderfolgende Aktivitäten, die je nach Bedarf iterativ wiederholt werden können. Diese stimmen teilweise mit dem aus der strukturierten Literaturrecherche identifizierten Vorgehensmodell (vgl. Abbildung 12) überein. Zunächst erfolgt eine **Nutzungskontext- & Anforderungsanalyse**. Dabei wird die Umgebung beschrieben, in der das System verwendet werden soll. Diese Beschreibung umfasst Merkmale der Benutzer, deren Aufgaben und die Besonderheiten der Umgebung (z.B. Beleuchtung oder Umgebungslautstärke). Ergänzend dazu werden die Nutzungsanforderungen erhoben. Sie bilden die Basis für die **Gestaltung** des interaktiven Systems. Zusätzlich sollten die Erkenntnisse und Anforderungen aus der strukturierten Literaturrecherche (z.B. Gestaltungsrichtlinien) in die Systemgestaltung einbezogen werden. Durch eine nutzerzentrierte **Evaluation** wird geprüft, ob die Anforderungen erfüllt wurden. Darüber hinaus

liefert die Erprobung „Rückmeldungen über die Stärken und Schwächen der Gestaltungslösung aus der Benutzerperspektive“ [20]. Die Erkenntnisse aus den Evaluationen liefern wertvolle Informationen zur systematischen Verbesserung des interaktiven Systems. Der beschriebene Prozess ist in der nachfolgenden Abbildung 15 schematisch dargestellt.

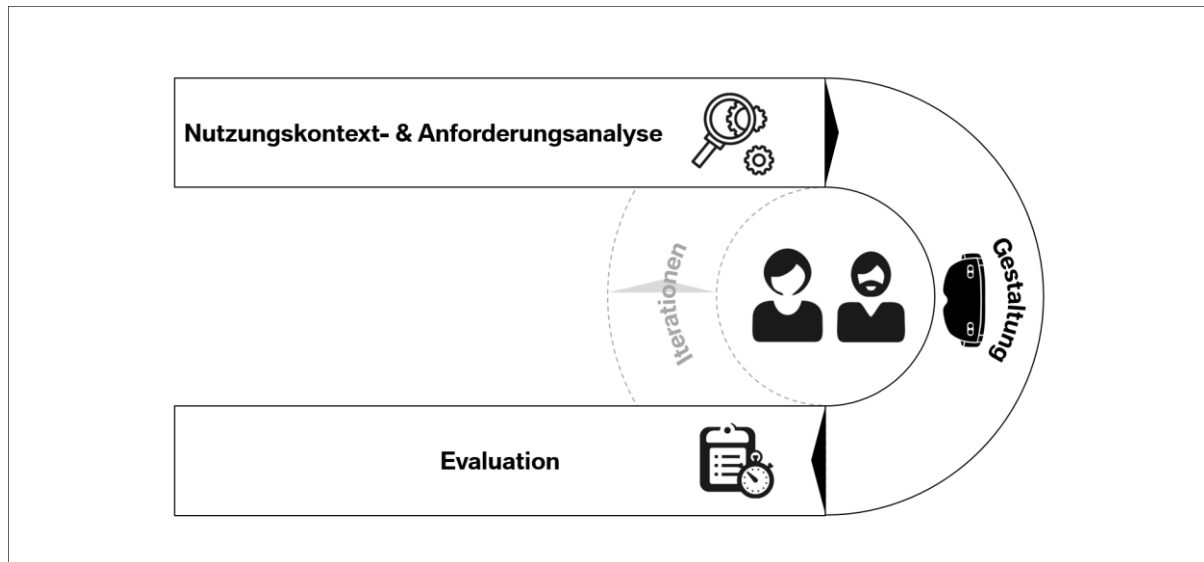


Abbildung 15: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme.

Quelle: in Anlehnung an die DIN EN ISO 9241-210: 2010.

Während der einzelnen Phasen des menschenzentrierten Entwicklungsprozesses sollten die Grundsätze der nachfolgenden Tabelle 12 berücksichtigt werden.

Tabelle 12: Grundsätze der menschenzentrierten Gestaltung.

Quelle: in Anlehnung an die DIN EN ISO 9241-210:2010.

Grundsätze	Beschreibung
Verständnis	Die Gestaltung eines interaktiven Systems beruht auf einem umfassenden Verständnis der Benutzer, ihrer Arbeitsaufgaben und der Arbeitsumgebung.
Menschenzentriert	Während der gesamten Gestaltung und Entwicklung des Systems sind die Benutzer einbezogen.
Evaluation	Systemoptimierungen erfolgen kontinuierlich auf Basis benutzerzentrierter Evaluationen.
Iterationen	Der gesamte Prozess ist iterativ.
User-Experience	Bei der Gestaltung muss das Benutzererlebnis (engl. User Experience [UX]) berücksichtigt werden.
Gestaltungsteam	Das Gestaltungsteam besitzt fachübergreifende Kenntnisse und Fähigkeiten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die menschenzentrierte Gestaltung einen geeigneten Rahmen für das Vorgehensmodell zur Entwicklung eines gebrauchstauglichen AR-basierten Trainingssystems darstellt. Auf eine Beschreibung geeigneter Methoden innerhalb der einzelnen Phasen wird allerdings in der Norm verzichtet. Grundsätzlich empfiehlt Zühlke [124] die Anwendung verschiedener Methoden für ein

Untersuchungsziel. Dies wird auch als **Triangulation** bezeichnet. Die Stärken einzelner Methoden ergänzen sich und führen schließlich zu einem höheren Erkenntnisgewinn [125]. Denzin [126] unterscheidet vier Arten der Triangulation. Bei der Triangulation von Daten werden diverse Datenquellen genutzt. Diese werden von verschiedenen Forschern (Triangulation von Forschern) mit mehreren Methoden erhoben und zusammengeführt (Triangulation von Methoden). Die Auswertung und Interpretation der Daten erfolgt auf Basis unterschiedlicher Theorien (Triangulation von Theorien).

Unter Berücksichtigung dieser Empfehlungen werden im Verlauf dieses Kapitels verschiedene Methoden zur Analyse, Gestaltung und Evaluation von AR-basierten Trainingssystemen diskutiert und auf Basis der Anforderungen aus der Literatur und der Praxis (Kapitel 3.5) zu einem Vorgehensmodell zusammengefasst.

4.2 Nutzungskontext- & Anforderungsanalyse

Die Analyse beginnt mit einer Beschreibung des **Nutzungskontexts**, in dem ein interaktives System verwendet werden soll. Daraus resultieren Informationen zu den Benutzern, ihren Arbeitsaufgaben und zur Anwendungsumgebung. Durch eine hinreichend detaillierte Beschreibung können Notwendigkeiten, Probleme oder Einschränkungen für den späteren Gebrauch aufgezeigt werden. Komplettiert wird die Analysephase durch eine Erhebung der **Nutzeranforderungen**. Sie bilden die Grundlage für die Gestaltung des interaktiven Systems. Anastassova et al. [127] zeigen auf, dass es an einer strukturierten Analysemethodik zur Entwicklung von gebrauchstauglichen AR-Systemen mangelt. Daher werden in diesem Abschnitt verschiedene Methoden vorgestellt und deren Anwendbarkeit zur Entwicklung eines AR-basierten Trainingssystems im industriellen Nutzungskontext diskutiert. Diese werden auf Basis der Anforderungen der Anwendungsdomäne (vgl. Tabelle 11) ausgewählt und zu einem Analyseverfahren zusammengefasst. Dabei stehen insbesondere ressourcenschonende Methoden im Vordergrund. Die wichtigsten sind in der DIN SPEC 91328 aufgeführt und beschrieben [128].

4.2.1 Dokumentenanalyse

Die qualitative Analyse von Dokumenten, wie Prozessbeschreibungen, Handbüchern oder Tätigkeitsbeschreibungen, liefert wertvolle grundlegende Informationen zum initialen Verständnis des Kontexts und der Aufgaben der Nutzer. Allerdings weichen die dokumentierten Beschreibungen oft von der Realität ab und besitzen demzufolge einen unzureichenden oder fehlerhaften Informationsgehalt [129]. Die Dokumentenanalyse sollte daher durch weitere Methoden ergänzt werden [130].

Im Zuge der Entwicklung eines AR-basierten Trainingssystems für manuelle Montageprozesse bietet die Dokumentenanalyse eine erste Möglichkeit, einen ausgewählten Montageprozess zu verstehen. Dabei sind insbesondere **Standardarbeitsanweisungen** von hoher Relevanz. Dies sind verschriftlichte, standardisierte Arbeitsabläufe. In einer Firma mit funktionierendem Qualitätsmanagementsystem existieren diese Dokumente für jede Montageprozedur.

4.2.2 Aufgabenanalyse

Bei der Aufgabenanalyse werden bestehende Arbeitsabläufe auf Basis von Beobachtungen oder Interviews analysiert und potentielle Einsatzmöglichkeiten von interaktiven Systemen zur Prozessverbesserung dargelegt. Dabei wird eine Hauptaufgabe (z.B. Montage eines Motors) in Teilaufgaben zerlegt, wodurch Aufgabenziele, Arbeitsreihenfolgen und benötigte Informationen identifiziert werden können. Die daraus resultierenden strukturierten Daten dienen als Grundlage für die technische und organisatorische Gestaltung des interaktiven Systems und zur Validierung mit allen Teilnehmern (z.B. durch Fokusgruppen-Diskussionen). Die Aufgabenanalyse wird stets in einer natürlichen Nutzungsumgebung mit den zukünftigen Benutzern durchgeführt. Als Durchführungsverantwortliche empfehlen sich ein Beobachter und ein Protokollant. [128]

Für die Entwicklung eines AR-basierten Trainingssystems bietet die Erstellung eines hierarchischen Strukturbaums die Möglichkeit, einen ausgewählten Montageprozess zu verstehen und das System auf Basis dieser Erkenntnisse zu gestalten. Im Hinblick auf eine ressourcenschonende Methodenauswahl besitzt die Aufgabenanalyse hinsichtlich der Durchlaufsdauer einen zeitlichen Vorteil, allerdings stellt der vergleichsweise hohe Personalaufwand ein Problem dar [78]. Montagearbeiter sind in der Fließbandproduktion gebunden und können für eine gemeinsame Diskussion der Ergebnisse nur schwer herausgelöst werden (vgl. Abschnitt 3.4.5)

4.2.3 Beobachtung

Die Observation der Benutzer erfolgt **direkt** oder **indirekt** während der Ausführung einer Handlung mit einem interaktiven System. Dabei erfordert eine direkte Beobachtung die Anwesenheit eines Beobachters, wohingegen sich die indirekte Beobachtung auf Video- oder Audioaufnahmen stützt [130]. Die indirekte Beobachtung sollte verwendet werden, wenn ein limitierter Zugang zur Anwendungsdomäne vorliegt. Dies ist oftmals bei Projekten zwischen Forschungseinrichtungen und der Industrie der Fall. Demnach bleibt es Wissenschaftlern häufig verwehrt, vollständig in den Nutzungskontext einzutauchen und Benutzer in ihrer natürlichen Arbeitsumgebung und Tätigkeit zu observieren.

Eine Sonderform stellt das **kontextuelle Interview** dar. Dies ist eine Kombination aus teilnehmender Beobachtung eines Benutzers beim Umgang mit einem interaktiven System im realen Nutzungskontext und einem teilstrukturierten Interview [128]. Im Vergleich zur klassischen Beobachtung können zusätzliche Anforderungen der Benutzer an das interaktive System durch gezieltes Nachfragen während der Tätigkeitsausführung erfasst werden. Ein wesentlicher Nachteil des kontextuellen Interviews ist die Fremdeinwirkung des Beobachters auf den Benutzer während der Observation. Im industriellen Umfeld können dadurch Störungen im Produktionsablauf entstehen. Um diese zu minimieren, empfiehlt sich das sogenannte **Shadowing** [131]. Dabei tritt der Beobachter in den Hintergrund und interagiert im Vergleich zum kontextuellen Interview nicht mit dem Benutzer. Oftmals wird das Shadowing durch die Methode des lauten Denkens (engl. think-aloud) ergänzt, wobei die Benutzer ihre Gedanken und Gefühle während der Nutzung eines interaktiven Systems durch Verbalisierungen zum Ausdruck bringen [132].

Alle genannten Beobachtungsmethoden liefern lediglich Erkenntnisse aus einer passiven Perspektive. Diese impliziert eine gewisse Distanz zum Benutzer, wodurch Beobachtungsfehler entstehen können. Darüber hinaus empfinden viele Personen einen Beobachter als störend, da sie sich bewertet fühlen. Eine Ergänzung liefert die **aktive Teilnahme** am Feldgeschehen, wodurch das Verständnis der Sichtweisen der Benutzer gefördert wird und neue Möglichkeiten zur Selbstbeobachtung eröffnet werden. [21]

Im Kontext der Entwicklung eines gebrauchstauglichen AR-basierten Trainingssystems bietet die Kombination aus direkter Beobachtung und aktiver Teilnahme eine geeignete Möglichkeit, den Nutzungskontext und die Nutzungsanforderungen zu erfassen. Auf Basis der Erkenntnisse können zielgerichtete Interviews erstellt werden.

4.2.4 Interview und Fragebogen

Ein Interview ist eine unstrukturierte, teilstrukturierte oder strukturierte mündliche Befragung von Einzelpersonen oder Gruppen [21]. Das **unstrukturierte Interview** orientiert sich an keinem Gesprächsleitfaden. Die befragten Personen äußern völlig frei ihre Gedanken (z.B. durch lautes Denken). Währenddessen geht der Interviewer spontan mit offenen Fragen auf bestimmte Äußerungen ein. In Folge entsteht eine große und komplexe Datenmenge, wodurch die Auswertung sehr aufwendig wird, da die Verbalisierungen per Audioaufnahmen aufgezeichnet, transkribiert und analysiert werden müssen [130]. Im Gegensatz dazu bietet das **strukturierte Interview**, mit einer festgelegten Anzahl und Reihenfolge von geschlossenen Fragen, eine standardisierte Vorgehensweise zur Befragung von Personen [128]. Ein Nachteil ist die intensive und zeitaufwändige Vorbereitung der Fragen. Eine Alternative stellt das **teilstrukturierte Interview** dar. Dabei orientiert sich die Befragung an einem Gesprächsleitfaden aus offenen und geschlossenen Fragen und ergänzt diesen durch spontane Fragen, die sich aus der Gesprächssituation ergeben [133]. Neben Einzelpersonen können auch Gruppen zu einer bestimmten Thematik befragt werden. Dies geschieht häufig in Form von **Fokusgruppen**. Hierbei finden sich mehrere Teilnehmer im Rahmen einer moderierten Gruppendiskussion zusammen und versuchen einen Konsens bezüglich einer Thematik zu finden (vgl. Kapitel 3.4). Die schriftliche Befragung der Personen erfolgt in Form von standardisierten oder nicht-standardisierten **Fragebögen**. Eine standardisierte Variante mit geschlossenen Fragen erfordert eine höhere Anzahl an Befragten, benötigt allerdings wenig Vorbereitungs- und Nachbereitungsaufwand und gewährleistet eine Vergleichbarkeit mit anderen Forschungsergebnissen [128]. Im Gegensatz dazu müssen nicht-standardisierte Fragebögen aufwendig vor- und nachbereitet werden und lassen sich nur schwer mit anderen Forschungsergebnissen vergleichen.

Im Zuge der Entwicklung eines AR-basierten Trainingssystems für manuelle Montagetätigkeit im industriellen Nutzungskontext bietet ein teilstrukturiertes Interview mit einzelnen Personen die Möglichkeit, die Nutzungsanforderungen zu erfassen. Dazu präsentiert der „Leitfaden Usability“ der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH nützliche Leitfragen [134]. Zusätzlich können die Trigger-Fragen von Osterwalder et al. [135] einen Mehrwert liefern. Sie helfen dabei, die Arbeitsaufgabe eines Nutzers zu analysieren und die positiven und negativen Aspekte einer Tätigkeit darzulegen⁶. Einzelinterviews sind gegenüber Gruppen-

⁶ Die Leitfragen sowie die Trigger-Fragen sind im Anhang aufgeführt.

Diskussionen in der Fließbandfertigung aufgrund des verringerten Personalbedarfs zu präferieren. Demnach müssen nur einzelne taktgebundene Personen für den Zeitraum der Befragung ersetzt werden. Realisiert wird dies durch sogenannte Springer (Reservepersonal). Diese hochqualifizierten Personen kommen immer dann zum Einsatz, wenn neue Arbeitskräfte angelernt werden, das Stammpersonal fehlt (z.B. durch Krankheitsfall) oder fluktuiert [121].

4.2.5 Explikation der Analysemethodik

Die vorgestellten Methoden zur Analyse des Nutzungskontexts und der Nutzungsanforderungen besitzen unterschiedliche Eigenschaften. Einige Methoden sind demnach besser geeignet, um den Kontext zu erfassen, andere Methoden wiederum sind zu bevorzugen, wenn die Anforderungen potentieller Nutzer eines interaktiven Systems ermittelt werden sollen. Nur in seltensten Fällen eignet sich eine einzige Methode zur Analyse des Kontexts und der Nutzungsanforderungen. Darüber hinaus unterscheiden sich die Methoden hinsichtlich des Personal-, des Zeit- und des Kostenaufwands. Dabei ergibt sich der Personalaufwand aus den Personen, die zur Versuchsvorbereitung, Durchführung und Auswertung nötig sind. Der Zeitaufwand beschreibt die dafür notwendige Dauer und der Kostenaufwand ist die Folge aus beiden. Unter Berücksichtigung der Forderung der Anwendungsdomäne (vgl. Tabelle 11), ressourcenschonende Methoden zu nutzen, vergleicht und bewertet die nachfolgende Tabelle 13 die dargelegten Methoden.

Tabelle 13: Vergleich verschiedener Methoden zur Kontext- und Anforderungsanalyse.

Quelle: eigene Darstellung.

Methode	Art	Analyseumfang		Aufwand		
		Kontext	Anforderungen der Nutzer	Ressourcenschonender Personenaufwand	Ressourcenschonender Zeitaufwand	Ressourcenschonender Kostenaufwand
Dokumentenanalyse	---	●	○	●	○	●
Aufgabenanalyse	---	●	●	○	●	●
Beobachtung	direkt	●	○	●	●	●
	indirekt	●	○	●	○	●
	kontextuelles Interview	●	●	○	●	●
	Shadowing	●	●	○	●	●
	aktive Teilnahme	●	●	●	○	●
Befragung	unstrukturiert	●	●	●	○	●
	teilstrukturiert	●	●	●	●	●
	strukturiert	●	●	●	●	●

Fokusgruppe	●	●	○	●	●
Fragebogen	●	●	○	●	●
	Bedingung erfüllt	Bedingung teilweise erfüllt	Bedingung nicht erfüllt		
Legende	●	●	○		

Um die Schwächen einzelner Methoden auszugleichen und deren Stärken zu nutzen, werden verschiedene Analysemethoden kombiniert zur Anwendung gebracht. Dabei steht der ressourcenschonende Einsatz im Vordergrund. Richter und Flückiger [136] empfehlen ein vereinfachtes Vorgehen und den Einsatz von wenigen Analysemethoden. Sie stützen sich dabei auf die Begrifflichkeit des „Discount Usability Engineering“ von Nielsen [137]. Demnach führt die Anwendung von einfachen und kostengünstigen Methoden bereits zu einem ausreichenden Erkenntnisgewinn. Darüber hinaus besteht eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass ein simples Vorgehen in der Praxis eher zur Anwendung kommt als eine komplexe, aufwändige Analysemethodik. Vor diesem Hintergrund setzt sich die Analysemethodik zum Verständnis des Nutzungskontexts und der Nutzeranforderungen aus drei Phasen zusammen.

Die erste Analysephase zielt darauf ab, den Nutzungskontext zu verstehen. Dafür wird zunächst eine Dokumentenanalyse durchgeführt. Im Rahmen dieser Dissertation beschränkt sich diese auf eine Standardarbeitsanweisung eines ausgewählten Montagearbeitsplatzes. Ergänzt wird diese „Outside-Perspektive“ [21] durch eine direkte bzw. teilnehmende Beobachtung an diesem Arbeitsplatz. Um den ressourcenschonenden Methodeneinsatz zu gewährleisten, beschränkt sich die Observation auf eine Durchführungsdauer von ein bis zwei Tagen in der Anwendungsdomäne. Bei dieser qualitativen Beobachtung verschriftlicht ein Beobachter alle verbalen und visuellen Eindrücke. Dieses Beobachtungsprotokoll kann durch zusätzliche Audio- oder Videoaufnahmen ergänzt werden. Aus datenschutzrechtlichen Gründen erweist sich dies im industriellen Nutzungskontext allerdings oft schwierig. Komplettiert wird die erste Analysephase durch die aktive Teilnahme in der Anwendungsdomäne. Im Rahmen dieser Dissertation wird das durch einen Produktionseinsatz realisiert. Hierfür begibt sich der Produktverantwortliche⁷ an den ausgewählten Montagearbeitsplatz und übernimmt für ca. fünf Tage die Aufgaben eines Montagearbeiters. Die Kombination aus Dokumentenanalyse, teilnehmender Beobachtung und aktiver Teilnahme fördert das Verständnis des Nutzungskontexts und der Sichtweisen der Benutzer. Auf dieser Basis lässt sich ein teilstrukturierter Interviewleitfaden ableiten, der sich an den Leitfragen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH [134] und dem Value Proposition Design [135] orientiert.

Dieser Interviewleitfaden wird in der zweiten Phase der Analyse genutzt, um die Anforderungen der Nutzer an die Gestaltung eines AR-basierten Trainingssystems in der manuellen Montage zu ermitteln. Um ausreichend viele Informationen zu erhalten, empfiehlt sich die Durchführung von 10-15 teilstrukturierten Einzelinterviews [128]. Dabei kann der Einsatz eines Diktiergeräts hilfreich sein. Alle verbalen Äußerungen können aufgenommen und im Anschluss an das Interview transkribiert werden. Die vorliegende Dissertation orientiert sich an der vereinfachten Transkription von Dresing und Pehl [138], da diese den Inhalt einer

⁷ Ein Produktverantwortlicher in einem Unternehmen definiert sich laut DIN SPEC 91328:2016 als Schnittstelle zwischen Benutzer und Hersteller interaktiver IT-Systeme und verantwortlich für dessen Auswahl bzw. dessen strategische (Weiter-) Entwicklung sowie den erfolgreichen Einsatz hinsichtlich Qualität und Wirtschaftlichkeit. [128]

Verbalisierung fokussieren und sprachliche Besonderheiten (z.B. Dialekte) ausklammern. Die verschriftlichten Transkripte liefern qualitative Daten und lassen sich mit Hilfe der themenbasierten Inhaltsanalyse (engl. Theme-based content analysis [TBCA]) auswerten [139]. Diese ressourcenschonende Methode wird vorrangig verwendet, um die Meinungen und das Verhalten von Personen zu analysieren. Neale und Nichols [139] bestätigen die Nützlichkeit dieser Methode für den Bereich VR- und AR-basierter Anwendungen. Daher wird die TBCA für alle qualitativen Datenanalysen im Rahmen dieser Dissertation genutzt. Die Methode nutzt ein induktives Vorgehen. Demnach werden aus den gesammelten Beobachtungen und verschriftlichten Nutzeraussagen aussagekräftige Kategorien gebildet und letztendlich Anforderungen abgeleitet.

Diese Anforderungen dienen als Grundlage für die dritte und letzte Analysephase. Mit Hilfe einer Aufgabenanalyse werden die zuvor erfassten Erkenntnisse strukturiert. Dabei wird der ausgewählte Montageprozess in seine Teilaufgaben zerlegt, um diesen durch den Einsatz des AR-basierten Trainingssystems zu optimieren (vgl. Abbildung 13). Ein hierarchischer Strukturbaum ist das Ergebnis der dritten Analysephase und dient als Grundlage zur Gestaltung des interaktiven Systems.

Eine zusammenfassende Darstellung der Analysemethodik zum Verständnis des Nutzungskontext und der Nutzeranforderungen zeigt die nachfolgende Abbildung 16.

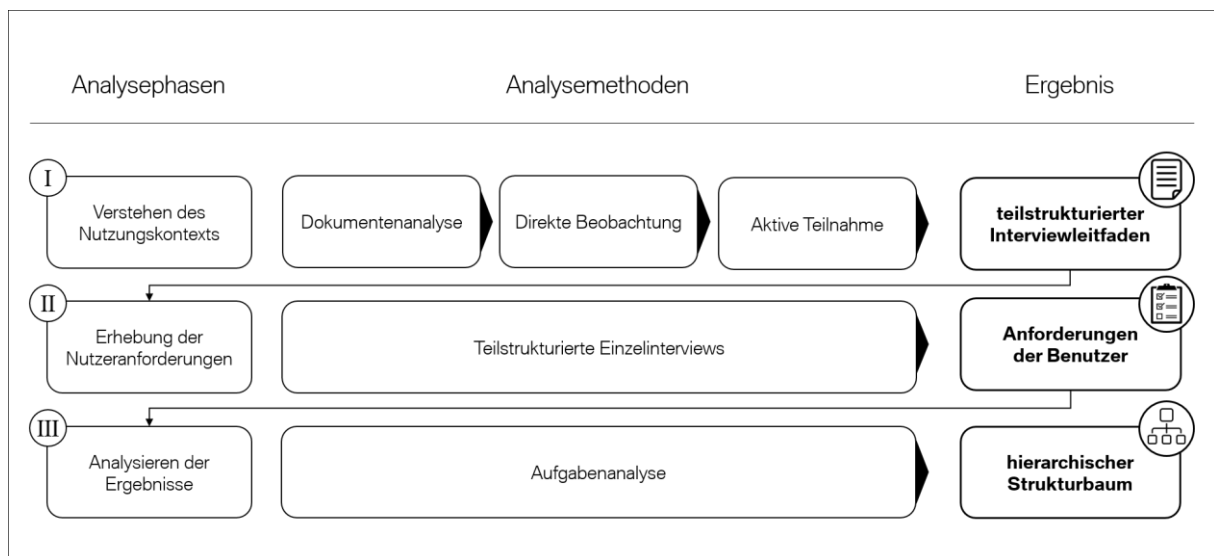


Abbildung 16: Vorgehen zur Analyse des Nutzungskontexts und der Nutzeranforderungen.

Quelle: eigene Darstellung.

4.3 Gestaltung

Im Rahmen der Gestaltung wird das gebrauchstaugliche AR-basierte Trainingssystem entwickelt. Dabei ermöglichen Zwischenversionen (Demonstratoren) in verschiedenen Ausprägungsstufen, abstrakte Sachverhalte begreifbar zu machen und das System iterativ zu formen [128]. Um eine ressourcenschonende Entwicklung dieser Demonstratoren sicherzustellen, werden häufig Papier-Prototypen und Konzeptskizzen verwendet [140]. Diese werden auch als Low-fidelity Prototypen bezeichnet und besitzen stark ein-

geschränkte Funktionalitäten und ein vereinfachtes Aussehen. Diese Prototyping-Ansätze sind für die Gestaltung von AR-Systemen allerdings nicht geeignet, da sie das Verständnis für diese neuartige Technologie nicht sicherstellen können [141]. Anastassova et al. [142] empfehlen daher Prototypen zu verwenden, die bereits ein ausgereiftes Design und viele Funktionalitäten besitzen (high-fidelity Prototypen). Nach Sá und Churchill [143] eignen sich diese im Kontext mobiler AR-Anwendungen ideal zur Evaluation der Gebrauchstauglichkeit, denn sie ermöglichen, neuartige Interaktionsmodalitäten sowie verschiedene Softwarefunktionalitäten (z.B. die Überlagerung von virtuellen Informationen mit realen Objekten) erlebbar zu machen und liefern dadurch wertvolle Informationen, die schließlich zu einer verbesserten Systemneugestaltung führen. Demzufolge wird im Rahmen dieser Dissertation ein high-fidelity Trainingssystem entwickelt, welches aus einem HMD und einer Trainingssoftware besteht.

Um die Anforderung der Anwendungsdomäne zu erfüllen, muss ein kabelloses AR-basiertes OST-HMD als Anzeigegerät verwendet werden (vgl. Tabelle 11). Hierfür geht aus der Literatur eine nahezu einheitliche Empfehlung hervor. Radkowski und Ingebrand [144] befürworten den Einsatz der **Microsoft HoloLens** auf Grundlage einer Fokusgruppen-Diskussion. Auch Blattgerste et al. [60] und Evans et al. [17] sehen die HoloLens als geeignetes Anzeigegerät, um Menschen bei der Ausführung von manuellen Montagetätigkeiten mit augmentierten Informationen zu unterstützen. Werrlich et al. [145] bekräftigen die Empfehlungen durch einen Vergleich zwischen HoloLens-basiertem und Trainer-basiertem Montagetraining. Demnach waren alle Probanden in der Lage, einen Motor mit dem HMD und der entwickelten Software zu montieren, allerdings benötigten sie eine gewisse Eingewöhnungszeit, um sich mit der augmentierten Visualisierung und den neuen Interaktionsparadigmen vertraut zu machen. Die Ergebnisse der Studie zeigen zudem, dass Probanden, die das Training mit dem HMD absolvierten, weniger Fehler machen als diejenigen, die mit einem Trainer angelernet wurden. Auf Basis dieses ausgewählten HMDs muss die Trainingssoftware entwickelt werden. Diese besteht aus verschiedenen Bestandteilen. Die nachfolgende Abbildung 17 fasst die wesentlichen zusammen.

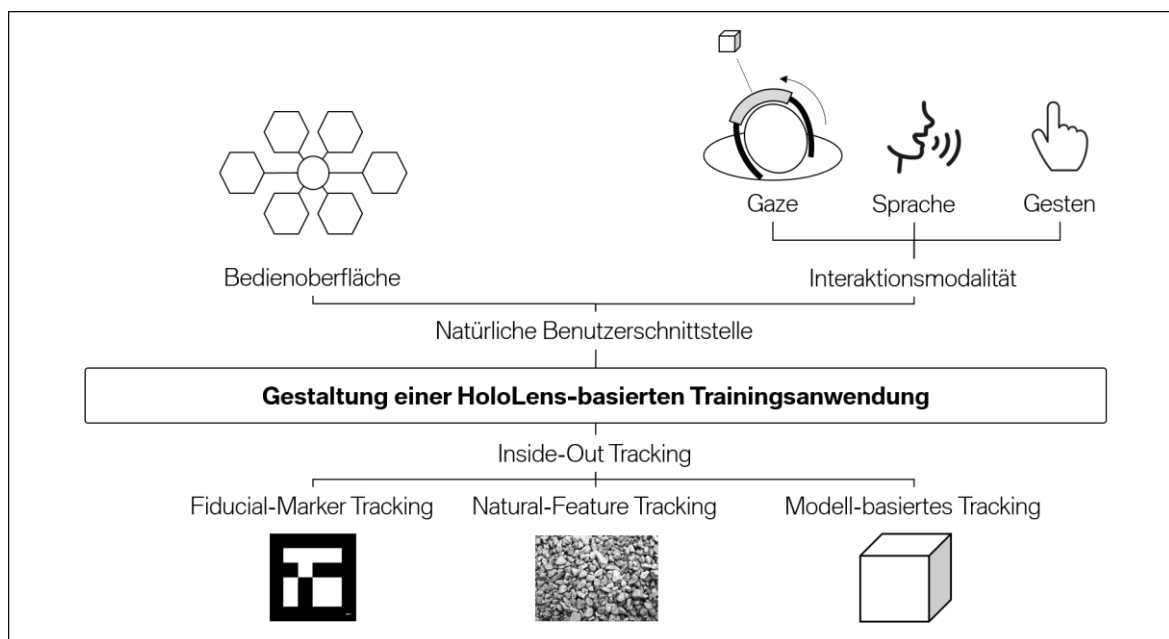


Abbildung 17: Gestaltungselemente der HoloLens basierten Trainingsanwendung.

Quelle: eigene Darstellung.

Eine Bedienoberfläche ermöglicht dem Benutzer, über diverse Interaktionsmodalitäten die Software zu steuern. Ein optisches Trackingverfahren (Inside-Out Tracking⁸) wird genutzt, um die Position des Benutzers im Raum zu bestimmen und dadurch eine lagerichtige Visualisierung der virtuellen Informationen zu gewährleisten. Vor dem Hintergrund ein gebrauchstaugliches AR-basiertes Trainingssystem zu entwickeln, sollten grundlegende Empfehlungen der Software-Ergonomie und konkrete Hinweise zur Gestaltung dieser Assistenzsysteme für manuelle Montagetätigkeiten berücksichtigt werden. Hierzu wurden bereits einige im Abschnitt 3.3.2 erläutert. Darüber hinaus werden in den folgenden Abschnitten, neben einer technischen Beschreibung des verwendeten HMDs, weitere wichtige Hinweise zur Systemgestaltung dargelegt. Dabei steht insbesondere die Ausgestaltung der natürlichen Benutzerschnittstelle im Rahmen dieser Dissertation im Vordergrund.

4.3.1 Microsoft HoloLens

Die Microsoft HoloLens (Abbildung 18) ist ein kabelloses OST-HMD mit einem horizontalen FOV von 35° und einem vertikalem FOV von 17°. Sie besitzt eine 32 Bit Architektur und funktioniert im Gegensatz zu vielen anderen HMDs ohne zusätzlichen PC, da eine CPU, eine GPU und eine HPU bereits integriert sind. Dadurch ist sie mit einem Gewicht von 579g vergleichsweise schwer. Die HoloLens nutzt ein **Inside-Out Tracking**, um ihre Lage relativ zu einem Referenzpunkt in der realen Umgebung bestimmen zu können. Das ist notwendig, um den Blickwinkel eines Benutzers zu bestimmen und virtuelle Objekte lagerichtig darzustellen. Für dieses optische Verfahren werden vier monochrome Kameras und eine inertielle Messeinheit (engl. inertial measurement unit [IMU]) genutzt. Die IMU besteht aus Beschleunigungssensoren, Gyroskopischen Sensoren und einem Magnetometer. Durch diese Sensoren können sechs kinematische Freiheitsgrade (engl. degrees of freedom [DOF]), jeweils drei in translatorischer und drei in rotatorischer Richtung, bestimmt werden. Über die Kameras werden Referenzpunkte in der realen Umgebung erfasst. Hierzu können spezielle optische Marker (engl. Fiducial), natürliche Umgebungsmerkmale oder Informationen von 3D-Objekten (z.B. ein Kantenmodell) genutzt werden. Mittels Triangulation und einer Fusion mit den IMU-Daten kann schließlich die Kameraposition in Echtzeit ermittelt werden.

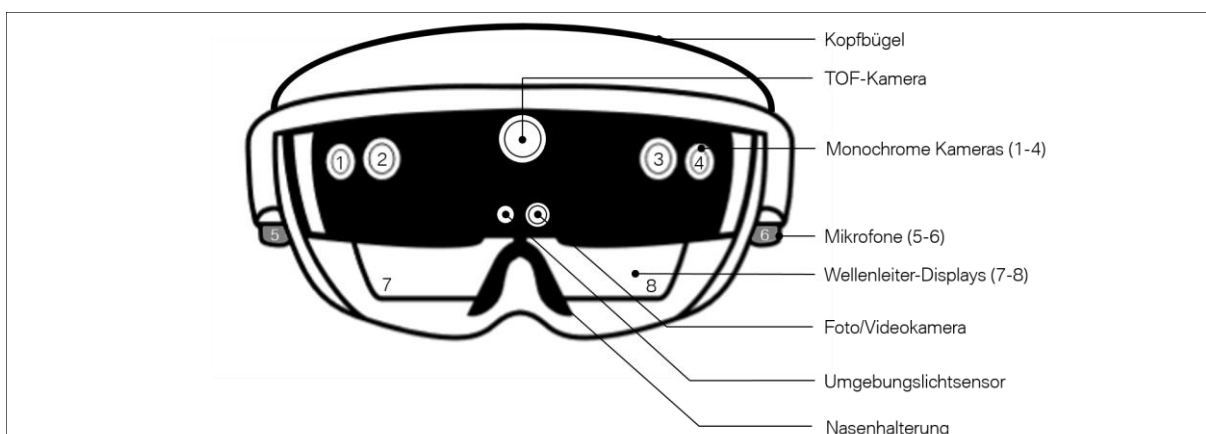


Abbildung 18: Microsoft HoloLens.

Quelle: in Anlehnung an Werrlich et al. [145]

⁸ Bei dieser Art des Trackings befinden sich die Kameras am Nutzer und bestimmen dessen räumliche Position. Im Gegensatz dazu befinden sich die Kameras beim Outside-In Tracking in der Umgebung.

Eine weitere Kamera, eine TOF-Kamera⁹, ist für die Erfassung der Gesten eines Benutzers zuständig. Ein Umgebungslichtsensor (engl. ambient light sensor) misst die Umgebungslichtstärke und adaptiert auf Basis dieser Messung die Helligkeit der augmentierten Inhalte. Fotos und Videos können über eine weitere Kamera aufgenommen werden. Zusätzlich dienen zwei integrierte Mikrofone zur Spracherkennung und Ausgabe von akustischen Informationen. [145]

Zur Darstellung von augmentierten Informationen nutzt die HoloLens zwei Wellenleiter-Displays (engl. waveguide displays). Dabei projizieren zwei Micro-Projektoren Lichtsignale über einen Wellenleiter entlang der Displays [146]. Die Signale werden über die Augen des Benutzers aufgenommen und im Gehirn zu einem Bild verarbeitet. Durch eine klare Trennung zwischen dem linken und dem rechten Display ist die HoloLens in der Lage, ein stereoskopisches Bild zu erzeugen. Neben der Visualisierung von 2D-Informationen wird somit die Darstellung von räumlichen 3D-Objekten möglich.

Eine natürliche Benutzerschnittstelle (engl. natural user interface [NUI]) ermöglicht dem Benutzer über verschiedene Interaktionsmodalitäten die direkte Interaktion mit einer augmentierten Bedienoberfläche. Zur Fokussierung eines virtuellen Objekts nutzt die HoloLens den sogenannten „Gaze“. Das ist ein virtueller Sichtstrahl (engl. Raycast), der als Zeigerobjekt dient und mittels Kopfbewegung gesteuert werden kann (ähnlich der Mausbewegung an einem PC). Über Sprachbefehle und Gesten kann der Nutzer Eingaben tätigen und direkt mit den Funktionselementen der Bedienoberfläche interagieren.

4.3.2 Inside-Out Tracking

Um die korrekte räumliche Lage virtueller Objekte im realen Raum zu bestimmen, muss die Position der Kamera und die Blickrichtung des Nutzers (Pose) ermittelt werden. Dies erfolgt in zwei Schritten. In der Initialisierungsphase wird zunächst die Pose relativ zu einem Fixpunkt im realen Raum ermittelt. Im Anschluss wird die Pose auf Basis der zuvor ermittelten Position ständig aktualisiert [122]. Hierfür können magnetische Infrarot-basierte oder das GPS-basierte Trackingverfahren eingesetzt werden [122]. Wie bereits zuvor beschrieben, besitzt die Microsoft HoloLens eine IMU und vier monochrome Kameras, die zur Bestimmung der Pose genutzt werden können. Da sich die Kameras direkt im HMD und somit am Kopf des Benutzers befinden, wird dieses Trackingverfahren als optisches Inside-Out Tracking bezeichnet. Es lässt sich in drei Kategorien unterteilen: Fiducial-Marker Tracking, Natural-Feature Tracking und Model-basiertes Tracking.

Beim **Fiducial-Marker basierten Tracking** werden üblicherweise zweidimensionale künstliche Marker (engl. fiducials) mit speziellen Formen und Farben genutzt. Diese werden in der Software hinterlegt und in der realen Welt positioniert. Das Tracking wird initialisiert, sobald die im HMD integrierten Kameras den Marker registrieren. Dadurch können die Position der Kamera und die Blickrichtung des Nutzers bestimmt werden. Darüber hinaus können virtuelle Objekte eingeblendet und exakt ausgerichtet werden [147]. Kato und Billinghurst [148] präsentieren mit ihrem ARToolkit die wohl bekanntesten künstlichen Marker. Sie besitzen einen weißen Hintergrund mit schwarzer Außenkontur und einem spezifischen Muster in der

⁹ TOF steht für den englischen Begriff Time-of-Flight. Bei dieser Methode wird die Umgebung durch Infrarot-Lichtimpulse ausgeleuchtet. Das von einem Objekt reflektierte Licht wird von der Kamera aufgenommen, wodurch die Laufzeit des Lichts bestimmt wird. Somit kann die Entfernung eines Objekts exakt bestimmt werden.

Mitte. Dadurch entsteht ein sehr hoher Kontrast, was die Bildverarbeitung erleichtert. Durch verschiedenste Algorithmen wird das Bild der Kamera analysiert und schließlich die räumliche Lage der Kamera bestimmt. Fiala [149] präsentiert mit dem ARTag eine Weiterentwicklung des ARToolkits. Demnach ist das Tracking stabiler und funktioniert auch unter ungünstigen Lichteinflüssen. Darüber hinaus werden Verdeckungsgeometrien (vgl. Kapitel 4.3.4) berücksichtigt.

Der Einsatz von Fiducial-Markern hat immer eine Veränderung der realen Umgebung zur Folge, da diese positioniert werden müssen. Zum Teil ist das Einbringen dieser künstlichen Marker nicht möglich oder unerwünscht. Dafür bietet sich das **Natural-Feature Tracking** an. Es können vorhandene Oberflächen (z.B. detailreiche, kontrastreiche Bilder) genutzt werden, um die Pose der Kamera zu bestimmen. Hierzu wird das Bild über die Kamera des HMDs erfasst und mittels Bildverarbeitungsalgorithmen auf kontrastreiche Besonderheiten (engl. Feature) analysiert. Die detektierten Feature werden mit einer in der Software hinterlegten Referenz abgeglichen, wodurch schließlich die räumliche Kameraposition ermittelt werden kann [150]. Das Software Development Kit (SDK) von Vuforia stellt hierfür eine geeignete Programm-bibliothek zur Verfügung und ermöglicht ein sehr robustes Tracking [151]. Das SDK ist kompatibel mit der Entwicklungsumgebung Unity3D und Visual Studio und liefert somit eine grundlegende Voraussetzung zur Entwicklung von Applikationen für die Microsoft HoloLens. Die Funktionalität des „Extended Trackings“ ermöglicht darüber hinaus die Ermittlung der Kamerapose, ohne dass sich ein Marker im Sichtbereich der Kamera befindet. Dazu wird über die im HMD integrierten Kameras und die IMU ein räumliches Abbild der realen Umgebung erzeugt (engl. spatial mapping).

Eine weitere Möglichkeit bietet das **Modell-basierte Tracking**. Bei diesem Verfahren werden Informationen von 3D-CAD Daten genutzt, um ein reales Referenzobjekt zu detektieren und dadurch die Kameraposition zu bestimmen. Ältere Ansätze basieren auf einer aufwändigen Vorbereitung der CAD Daten zu einem Kantenmodell [152]. Die extrahierten Informationen des Modells werden genutzt, um die Kanten des realen Referenzobjekts zu erfassen und dadurch die Kamera-Pose zu bestimmen. Um die Robustheit dieses Trackings zu steigern, kann das Kanten-basierte Verfahren mit dem Natural-Feature Tracking kombiniert werden [153]. Die genannten Verfahren nutzen vorhandene Informationen, um die Position der Kamera zu bestimmen (z.B. 3D-CAD Daten). Ein Verfahren, das ohne Vorinformationen auskommt, stellt das PTAM-Verfahren (engl. Parallel Tracking and Mapping) von Klein und Murray [154] dar, welches speziell für AR-Anwendungen entwickelt wurde. Dabei wird in zwei separaten Prozessen (engl. Threads) die Karte einer unbekannten Umgebung (engl. Mapping) erstellt und die Kamera-Pose anhand von Bildmerkmalen ermittelt. Diese Verfahren bietet ein robustes Tracking und eignet sich für kleine räumliche Umgebungen.

4.3.3 Grundsätze der Dialoggestaltung

Die DIN EN ISO 9241-110:2006 definiert einen Dialog als „Interaktion zwischen einem Benutzer und einem interaktiven System in Form einer Folge von Handlungen des Benutzers (Eingaben) und Antworten des interaktiven Systems (Ausgaben), um ein Ziel zu erreichen“ [155]. Dementsprechend stellt die Eingabe des Benutzers über die Interaktionsmodalitäten Gaze, Sprache und Gesten und die Ausgabe von

audiovisuellen Inhalten über das Display der HoloLens einen Dialog dar. Für die Gestaltung einer gebrauchstauglichen natürlichen Benutzerschnittstelle empfiehlt die DIN EN ISO 9241-110:2006 die Einhaltung folgender sieben Grundsätze.

Informationen müssen **aufgabenangemessen** visualisiert werden und den Benutzer während der Ausführung seiner Tätigkeit unterstützen. Dabei ist darauf zu achten, dass nur Inhalte dargestellt werden, die im Zusammenhang mit der Arbeitsaufgabe stehen. Unnötige Informationen sind zu vermeiden, denn diese können zu einer verminderten Arbeitsleistung und einer höheren mentalen Beanspruchung führen. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass Dialoge **selbstbeschreibungsfähig** sind. Einem Nutzer müssen geeignete Informationen bereitgestellt werden, sodass diesem klar ist, in welchem Dialogschritt er sich befindet und durch welche Handlungen dieser abgeschlossen werden kann. Dabei sollte die Informationsbereitstellung **erwartungskonform** erfolgen. Sie muss den Erwartungen eines Benutzers sowie anerkannten Konventionen entsprechen und konsistent sein. Um die Bedienung eines interaktiven Systems zu erleichtern, müssen Dialoge **lernförderlich** gestaltet werden. Dem Nutzer sollten Informationen zur Verfügung gestellt werden, die ein konzeptionelles Verständnis einer Software ermöglichen. Hierfür können Hilfsinformationen und angemessene Rückmeldungen hilfreich sein. Darüber hinaus steigert ein gefahrloses Erproben einer Software die Lernförderlichkeit. Um dies zu gewährleisten, müssen Dialoge **steuerbar** sein. Realisiert werden kann dies durch geeignete grafische Funktionselemente, beispielsweise zum Vorwärts und Rückwärts schalten bei Schritt-für-Schritt Anweisungen, auf einer Bedienoberfläche. Dabei sollte das System **fehlertolerant** sein und falsche Eingaben des Benutzers grundsätzlich vermeiden bzw. Fehler erkennen, korrigieren und Informationen bereitstellen, die zur Problemlösung beitragen. Mit Hilfe **individualisierbarer** Bedienoberflächen und der Bereitstellung von verschiedenen Informationen können die Bedürfnisse unterschiedlicher Nutzer berücksichtigt werden.

Bei der Visualisierung von augmentierten Informationen zur Unterstützung manueller Montagetätigkeiten sollten neben den genannten grundlegenden Regeln, weitere Empfehlungen und Richtlinien berücksichtigt werden. In den nachfolgenden Abschnitten sind diese näher erläutert.

4.3.4 Visualisierung von augmentierten Informationen

Augmentierte Inhalte können mittels verschiedener Anzeigegeräte (vgl. Tabelle 1) dargestellt werden. In der vorliegenden Dissertation wird ein HMD (Microsoft HoloLens) genutzt. Durch dieses können sowohl zweidimensionale (z.B. Bilder, Videos oder Text) als auch dreidimensionale virtuelle Informationen im direkten Sichtfeld des Benutzers visualisiert werden. Bei industriellen Anwendungen, wie einer HMD-basierten Trainingssoftware für manuelle Montagetätigkeiten, spielt die semantische Relevanz der augmentierten Informationen eine besonders große Rolle [156]. Dabei müssen die visualisierten virtuellen Inhalte zum besseren Verständnis des Montageprozesses beitragen. Dieser lässt sich in die grundlegenden Einzelaktivitäten Identifikation, Entnahme, Ausrichtung und Verbindung eines Bauteils untergliedern [157]. Die Aktivitäten müssen durch geeignete audiovisuelle Informationen unterstützt werden, um eine effektive und effiziente Montage zu gewährleisten. In der Literatur existieren dazu verschiedene Empfehlungen.

Biocca et al. [158] präsentieren mit ihrem „Attention Funnel“ ein visuelles Element, das einem Benutzer die Identifikation und Entnahme relevanter Bauteile erleichtert. Dabei wird dieser über eine virtuelle Bézierkurve (ähnlich eines Tunnels) im direkten Sichtfeld zur Position des Zielobjekts geleitet. Im Vergleich zu alternativen Kommissionierunterstützungen konnte die Identifikations- und Entnahmezeit sowie die mentale Beanspruchung der Probanden durch den Tunnel reduziert werden. Schwerdtfeger und Klinker [159] präsentieren in einer weiteren Studie, dass Entnahmefehler durch die **Tunnel-Visualisierung** im Vergleich zu einer Pfeil-Visualisierung reduziert werden können. Die Ergebnisse der Interviews zeigen zudem, dass Probanden den Tunnel intuitiv wahrnehmen und als hilfreich empfinden. Auch Reif und Günther [160] belegen mit einem quantitativen Nachweis, dass die Effektivität und Effizienz durch diese Art der Visualisierung gegenüber herkömmlichen Methoden (z.B. Papierliste) gesteigert werden können.

Die Ausrichtung eines Bauteils erfordert Informationen über dessen räumliche Lage. Hierzu werden hauptsächlich virtuelle 3D-Objekte genutzt, die am entsprechenden Ort im realen Raum positioniert werden. Um dem Benutzer die räumliche Lage verständlich zu vermitteln, müssen insbesondere Tiefenbildinformationen korrekt dargestellt werden. Hierfür werden sogenannte **Verdeckungsgeometrien** (engl. Occlusion objects) genutzt [161]. Diese werden verwendet, um eine Aussage darüber zu treffen, ob sich ein virtuelles Objekt vor oder hinter einem realen Objekt befindet. Abhängig von der Blickrichtung des Benutzers wird über eine Software die korrekte räumliche Lage der virtuellen Informationen berechnet. Blattgerste et al. [162] zeigen auf, dass eine falsche räumliche Darstellung zu einer Fehlinterpretation (engl. spatial ambiguity) der Probanden führt und Montagefehler verursacht. Daher ist der Einsatz von Verdeckungsgeometrien essenziell bei der Vermittlung von manuellen Montagetätigkeiten. In einem Vergleich zwischen vier verschiedenen Visualisierungen (3D In-situ¹⁰, 3D In-situ Drahtgittermodell, 2D In-situ, Side-by-Side) belegen Blattgerste et al. [60], dass durch die Darstellung von **statischen 3D In-situ Informationen** die Montagezeit, die Montagefehler und die mentale Beanspruchung der Probanden im Vergleich zu den anderen Visualisierungsarten verringert werden kann. Die Side-by-Side Visualisierung¹¹ schnitt im Vergleich zu allen anderen Darstellungsarten am schlechtesten ab. Damit widerlegen Blattgerste et al. eine frühere Studie von Khuong et al. [163]. In dieser führten animierte In-situ Drahtgittermodelle im Vergleich zu einer Side-by-Side Visualisierung zu einer höheren Fehlerrate, längeren Montagezeiten und einer höheren mentalen Beanspruchung der Probanden. Sie führen dieses Ergebnis auf eine fehlerhafte Positionsdarstellung der virtuellen Objekte zurück, die aus dem mangelnden Tracking des VST-HMDs resultiert. Neuere HMDs, wie die Microsoft HoloLens, gewährleisten ein stabiles Tracking. Daher können auch **animierte 3D In-situ Drahtgittermodelle** für manuelle Montagetrainings nützlich sein.

Neben der Darstellung von 3D-Informationen sind auch 2D-Inhalte für ein manuelles Montagetraining verwendbar. Mit Hilfe eines HMDs können **Videos** mit Informationen zur Ausführung einer Tätigkeit im direkten Sichtfeld des Benutzers dargestellt werden [164]. Darüber hinaus eignen sich auch **Textinhalte**, um den Benutzer bei der Ausführung einer bestimmten Tätigkeit zu unterstützen [165]. Zusätzlich zu den bereits genannten Informationsmöglichkeiten bietet die Microsoft HoloLens über integrierte Lautsprecher die Möglichkeit, einem Benutzer **Audioanweisungen** zu geben.

¹⁰ Bei der In-Situ Visualisierung werden Informationen am relevanten Ort dargestellt.

¹¹ Bei der Side-by-Side Visualisierung werden virtuelle 3D-Modelle neben dem realen Objekt platziert. Es findet daher keine Überlagerung statt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es verschiedene Informationsmöglichkeiten gibt, um eine Person während eines Anlernprozesses zu unterstützen. Grünwied [166] führt an, dass „manche Texte und Bilder bevorzugen, um sich anleiten zu lassen, andere wiederum sehen sich lieber Videos an“. Daher sollten interaktive Lernsysteme laut Moreno und Mayer [167] **multimodal** gestaltet werden, um verschiedene Lerntypen anzusprechen. Eine Kombination aus verbalen und non-verbalen Informationen führt demnach zu einem höheren Lernerfolg. Darüber hinaus steigert ein multimodales Lernsystem das Interesse eines Benutzers und den Spaß beim Erlernen neuer Tätigkeiten [168]. Allerdings sollte bei der Gestaltung von AR-basierten Trainingssystemen beachtet werden, dass nicht mehr als vier bis fünf Informationen zur gleichen Zeit dargestellt werden [169]. Demnach führen zu viele Informationen zu einer erhöhten mentalen Beanspruchung und folglich zu einem verminderten Trainingseffekt. Pötters et al. [170] zeigen zudem auf, dass die Motivation und die Leistung von Montagearbeitern durch den Einsatz von spielerischen Gestaltungselementen (engl. **Gamification**) gesteigert werden kann.

4.3.5 Gamification in der manuellen Montage

Der Begriff Gamification beschreibt ein Konzept, bei dem spielerische Gestaltungselemente in einem nicht-spielerischen Kontext genutzt werden [171]. Dadurch lässt sich die Motivation und das Engagement zur Bewältigung praktischer Probleme steigern [172]. Im Kontext des manuellen Montagetrainings scheint dieser Ansatz besonders geeignet zu sein, da eine permanente Wiederholung von prozeduralen Tätigkeiten zum Konzentrations- und Motivationsverlust einer Person führen kann und folglich Fehler verursacht [173]. Spielerische Elemente dienen in der manuellen Montage demnach als Hilfsmittel, um Personen in einen mentalen Zustand zu versetzen, bei dem sie sich völlig auf ihre Tätigkeit fokussieren und an den Erfolg ihrer Handlung glauben [174]. Dieser Zustand wird als „Flow“ bezeichnet und setzt folgende Bedingungen voraus [175]:

- **Einbindung:** Eine Person muss in einer Handlung involviert sein und klare Ziele verfolgen. Dabei muss die Tätigkeit eine vorgegebene Richtung und eine klare Struktur aufweisen.
- **Balance:** Eine Person sollte in der Lage sein, eine Tätigkeit auszuführen. Dabei sollte der Schwierigkeitsgrad der Aufgabe den Fähigkeiten einer Person angepasst sein.
- **Feedback:** Eine Person sollte unmittelbares und verständliches Feedback für jede Handlung erhalten. Das hilft einer Person, eine Tätigkeit abzuschließen und eine neue zu beginnen.
- **Belohnung:** Eine Tätigkeit sollte intrinsisch belohnend sein und von einer Person als mühelos wahrgenommen werden.

Um den „Flow-Zustand“ zu erreichen, müssen die genannten Bedingungen bei der Gestaltung eines interaktiven Trainingssystems berücksichtigt werden. Im Kontext der manuellen Montage präsentieren Korn et al. [176] eine spielerische AR-Anwendung und adressieren die genannten Bedingungen wie nachfolgend beschrieben. Die Einbindung der Benutzer erfolgt durch Vorgabe einer gesamten Montagesequenz mit mehreren Teilschritten. Durch visuelle Elemente wie **Fortschrittsanzeigen** oder **Prozessübersichten** wird der Aufbau einer klaren Struktur unterstützt. Eine gute Balance kann über verschiedene

Schwierigkeitsstufen (Level) realisiert werden. Zunächst erhält der Benutzer über das interaktive System ausreichend viele Informationen, um den Prozess erfolgreich abzuschließen. Über sukzessive Anpassungen der Software (z.B. geringere Informationsbereitstellung) kann die Schwierigkeit gesteigert werden. Ein Nutzer sollte bei jeder Interaktion mit dem interaktiven System ein Feedback erhalten, welches über **farbliche Veränderungen** oder **Töne** realisiert werden kann. In diesem Zusammenhang zeigen Sigrist et al. [177] auf, dass multimodales Feedback einen positiven Effekt auf das Erlernen einer neuen Tätigkeit hat, da die mentale Beanspruchung einer Person reduziert werden kann. Allerdings sollte es angemessen gestaltet werden und den Benutzer nicht „erdrücken“. Eine Belohnung kann ebenfalls in Form von **audiovisuellen Informationen** erfolgen und sollte sowohl für Teilschritte als auch für den gesamten Prozess vorgesehen werden.

Auf Basis dieser Empfehlungen präsentieren Korn et al. [178] ein projektionsbasiertes AR-System mit spielerischen Gestaltungselementen. Die Ergebnisse einer Evaluation mit leistungsgewandelten Personen zeigen, dass die Montagezeit durch den Einsatz des spielerischen Assistenzsystems reduziert werden konnte. Allerdings nahmen die Montagefehler zu. Sie führen dieses Ergebnis auf die Beeinträchtigung der Nutzer zurück und fordern weiterführende Studien im industriellen Kontext mit Menschen ohne Handicap. Dieser Forderung wird die vorliegende Dissertation durch die Berücksichtigung spielerischer Gestaltungselemente in der Systemgestaltung und deren Evaluation mit echten Anwendern gerecht.

4.3.6 Gestaltung einer natürlichen Benutzerschnittstelle

Eine Benutzerschnittstelle (engl. user interface [UI]) ermöglicht einem Benutzer, mit einem interaktiven System zu kommunizieren. Bei klassischen Bildschirm-basierten Computern besteht die Benutzerschnittstelle aus einer grafischen Bedienoberfläche (engl. graphical user interface [GUI]) und mindestens einer Interaktionsmodalität. Die Bedienoberfläche wird nach dem WIMP-Paradigma gestaltet und beinhaltet Fenster (engl. Windows), Symbole (engl. Icons), Menüs (engl. Menus) und einen Zeiger (engl. Pointer). Diese sollten übersichtlich angeordnet werden, ohne den Benutzer mit zu vielen Informationen zu überfordern [179]. Die Interaktion mit den Funktionselementen der Bedienoberfläche erfolgt über die Maus und die Tastatur des Computers. Eine Weiterentwicklung dieses Grundkonzepts stellen **interaktive Systeme mit NUI's** dar. Diese verzichten auf die klassischen Eingabegeräte und nutzen stattdessen Bedienoberflächen, die mittels Berührung, Sprach- oder Gesteninteraktion steuerbar sind [180]. Daher lassen sich die klassischen Paradigmen zur Gestaltung einer natürlichen Benutzerschnittstelle nicht anwenden [124]. Um die Entwicklung dennoch zu ermöglichen, können allgemeingültige Gestaltungsrichtlinien hilfreich sein. Hierzu liefert Norman [181] sieben fundamentale Prinzipien. Weitere „8 goldene Regeln zur Gestaltung von Benutzerschnittstellen“ präsentieren Shneiderman und Plaisant [182]. Darüber hinaus empfehlen Nielsen und Molich [86] zehn Heuristiken zur Gestaltung von gebrauchstauglichen Benutzerschnittstellen. Da sich die Gestaltungsempfehlungen teilweise überschneiden, lassen sich diese wie folgt zusammenfassen:

- **Feedback:** Jede Aktion eines Benutzers sollte durch das interaktive System unmittelbar bestätigt werden. Dabei sollte die Art des Feedbacks der Aufgabe angemessen sein und weder zu stark, noch

zu gering sein. Mit dem in dieser Dissertation verwendeten HMD erfolgen die Eingaben des Benutzers über Gaze sowie Sprachbefehle und Gesten (Abbildung 17). Ausgaben werden in Form von visuellen Rückmeldungen über die virtuelle Bedienoberfläche und auditiven Signalen über integrierte Lautsprecher realisiert.

- **Affordanz:** Eine Benutzerschnittstelle sollte selbsterklärend gestaltet sein. Dabei sollten die Elemente einer Bedienoberfläche den entsprechenden Funktionen der Software zuordenbar sein. Zwischen der Eingabe eines Benutzers und der Ausgabe des Systems muss ein kausaler Zusammenhang bestehen.
- **Einfachheit:** Die Bedienoberfläche sollte einfach gestaltet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass ausschließlich für den Benutzer relevante Informationen angezeigt werden. Zudem sollten sich die Interaktionsmodalitäten auf einige wenige beschränken. Vor diesem Hintergrund könnte lediglich ein Sprachbefehl (z.B. Auswahl bzw. Select) genutzt werden, um jedes Funktionselement einer Bedienoberfläche auszuwählen. Eine konsistente Informations- und Interaktionsgestaltung sollte stets berücksichtigt werden. Dadurch wird die Belastung beim Arbeiten mit dem interaktiven System reduziert, was zur Steigerung der Gebrauchstauglichkeit führt [183]
- **Diversität:** Bei der Gestaltung der Benutzerschnittstelle sollten verschiedene Nutzeranforderungen (z.B. zwischen Anfänger und Experten) berücksichtigt werden. Anfänger benötigen zu Beginn einer Tätigkeit eine Einführung und die Bereitstellung von umfangreichen Informationen. Im Gegensatz dazu benötigt ein Experte weniger Informationen, um eine Arbeitsaufgabe erfolgreich zu absolvieren. Die Verwendung von Tastenkombinationen (engl. Shortcuts) könnte für einen fortgeschrittenen Nutzer für schnelle Systemeingaben hilfreich sein.
- **Entdeckbarkeit:** Ein Benutzer sollte die Möglichkeit haben, die Funktionalitäten eines interaktiven Systems gefahrlos zu erproben. Mit Hilfe von audiovisuellen Hinweisen, sogenannten „Signifiers“, kann einem Benutzer mitgeteilt werden, wo die nächste Interaktion erfolgen sollte (z.B. Aufleuchten eines Buttons). Um dies zu ermöglichen, muss die Benutzerschnittstelle fehlerhandlungssicher gestaltet sein. Bei Falscheingaben sollte der Benutzer eine Benachrichtigung mit einem Lösungshinweis erhalten. Zusätzlich muss jede Fehlerhandlung reversibel sein, um das System in den gewünschten Ausgangszustand zu versetzen.
- **Geschlossenheit:** Dialoge müssen in sich geschlossen sein und einen definierten Ausgangs- und Endpunkt besitzen. Unterstützt werden kann dies über visuelle Elemente (z.B. Fortschrittsbalken) oder akustische Hinweise. Dadurch kann der Benutzer ein mentales Modell aufbauen und den Prozess ganzheitlich verstehen.

Die genannten Empfehlungen müssen bei der Gestaltung einer natürlichen Benutzerschnittstelle berücksichtigt werden, substituieren allerdings nicht deren iterative Entwicklung [87]. Trotz der Einhaltung aller Gestaltungsrichtlinien kann die Benutzerschnittstelle Schwachstellen aufweisen, die nur mittels geeigneter Evaluationen aufgedeckt werden können. Darüber hinaus dienen die Empfehlungen lediglich als

Grundlage zur Entwicklung einer natürlichen Benutzerschnittstelle für HMD-basierte Trainingsanwendungen, denn sie adressieren AR-spezifische Gestaltungsherausforderungen (z.B. Art des Anzeigegeräts oder Interaktionsmodalitäten) nicht [184]. Sie müssen interpretiert und auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden [185].

Ergänzend zu den zuvor beschriebenen relevantesten Gestaltungsrichtlinien präsentieren Endsley et al. [186] neun Empfehlungen für die gebrauchstaugliche Gestaltung von AR-Benutzerschnittstellen. Diese lassen sich auch auf die Gestaltung der HoloLens-basierten Benutzerschnittstelle anwenden. Einige der genannten Empfehlungen werden bereits durch die im Abschnitt 4.3.4 beschriebenen Visualisierungsempfehlungen adressiert. Demnach kann der Zugang zu Objekten, die außerhalb des Sichtfelds liegen, über eine Tunnel-Visualisierung realisiert werden. In der nachfolgenden Tabelle 14 sind alle Empfehlungen aufgeführt und kurz beschrieben.

Tabelle 14: Gestaltungsempfehlungen AR-Benutzerschnittstellen.

Quelle: eigene Darstellung.

Nr.	Gestaltungsempfehlung	Beschreibung
1	Anpassung an Umgebung und Arbeitsaufgabe	Die visuellen Elemente der Bedienoberfläche sollten den Umgebungsbedingungen, den Aufgaben, den Vorstellungen und Gewohnheiten der Benutzer entsprechen.
2	Form kommuniziert Funktion	Die Gestaltung der virtuellen Elemente sollte sich an bestehenden Metaphern orientieren, sodass deren Funktionen selbsterklärend sind.
3	Minimierung der Ablenkung und Belastung	Augmentierte Elemente sollten auf ein Minimum reduziert werden, um die visuelle Ablenkung und Belastung des Nutzers zu reduzieren.
4	Adaption an Position und Bewegung des Benutzers	Virtuelle Objekte müssen so gestaltet und angeordnet werden, dass ein Benutzer aus verschiedenen Blickwinkeln, Abständen und Bewegungen mit ihnen interagieren kann.
5	Harmonisierung zwischen realer und virtueller Umgebung	Die Positionierung virtueller Objekte im realen Raum sollte Sinn ergeben.
6	Anpassung an die körperlichen Fähigkeiten eines Nutzers	Interaktionsmodalitäten sollten einfach gestaltet werden und den körperlichen Fähigkeiten eines Nutzers entsprechen. Sie sollten weder anstrengend noch gefährlich sein.
7	Anpassung an die Wahrnehmungsfähigkeiten eines Nutzers	Die Größe, Farbe, Bewegung, Distanz und Auflösung virtueller Objekte sollten der Wahrnehmungsschwelle eines Nutzers entsprechen.
8	Zugang zu Objekten außerhalb des Sichtbereichs	Virtuelle Objekte, die außerhalb des Sichtfelds des Benutzers liegen, sollten einfach auffindbar sein.
9	Anpassung an Hardware-Plattform	Die Benutzerschnittstelle sollte entsprechend den Möglichkeiten und Limitationen des verwendeten Ausgabegeräts gestaltet werden.

Zusätzlich zu den bereits genannten Richtlinien ergänzen die Erkenntnisse aus der strukturierten Literaturrecherche (vgl. Abschnitt 3.3.2) die Empfehlungen zur Gestaltung einer gebrauchstauglichen HMD-basierten Benutzerschnittstelle.

4.3.7 Zusammenfassung der Gestaltungshinweise

Die Entwicklung eines AR-basierten Trainingssystems erfordert die Auswahl eines geeigneten Anzeigegeräts und die Gestaltung von verschiedenen Softwarefunktionalitäten. Auf Basis der aktuellen Literatur

und den Anforderungen der Anwendungsdomäne (vgl. Tabelle 11) wurde die Microsoft HoloLens als geeignetes HMD zur Unterstützung manueller Montagetrainings ausgewählt und technisch beschrieben. Auf dieser Grundlage erfolgt die Gestaltung einer Trainingssoftware für manuelle Montage Tätigkeiten. Dabei sollten diverse Faktoren berücksichtigt werden. Die **Ausgangsbasis** bilden die Erkenntnisse aus der Nutzungskontextanalyse, der Anforderungsanalyse und der strukturierten Literaturrecherche (vgl. Abschnitt 3.3). **Allgemeine Empfehlungen** zur Gestaltung interaktive Systeme liefern die Grundsätze der Dialoggestaltung und die Gestaltungsrichtlinien für Benutzerschnittstellen. **Konkrete Empfehlungen** zur Visualisierung von augmentierten Inhalten und die Berücksichtigung spielerischer Gestaltungselemente im Kontext der manuellen Montage ergänzen die Empfehlungen. Mit dem Ziel eine gebrauchstaugliche HMD-basierte Trainingssoftware für manuelle Montage Tätigkeiten zu entwickeln, sollten die in diesem Abschnitt beschriebenen Gestaltungsempfehlungen berücksichtigt werden. Die nachfolgende Abbildung 19 fasst diese zusammen.

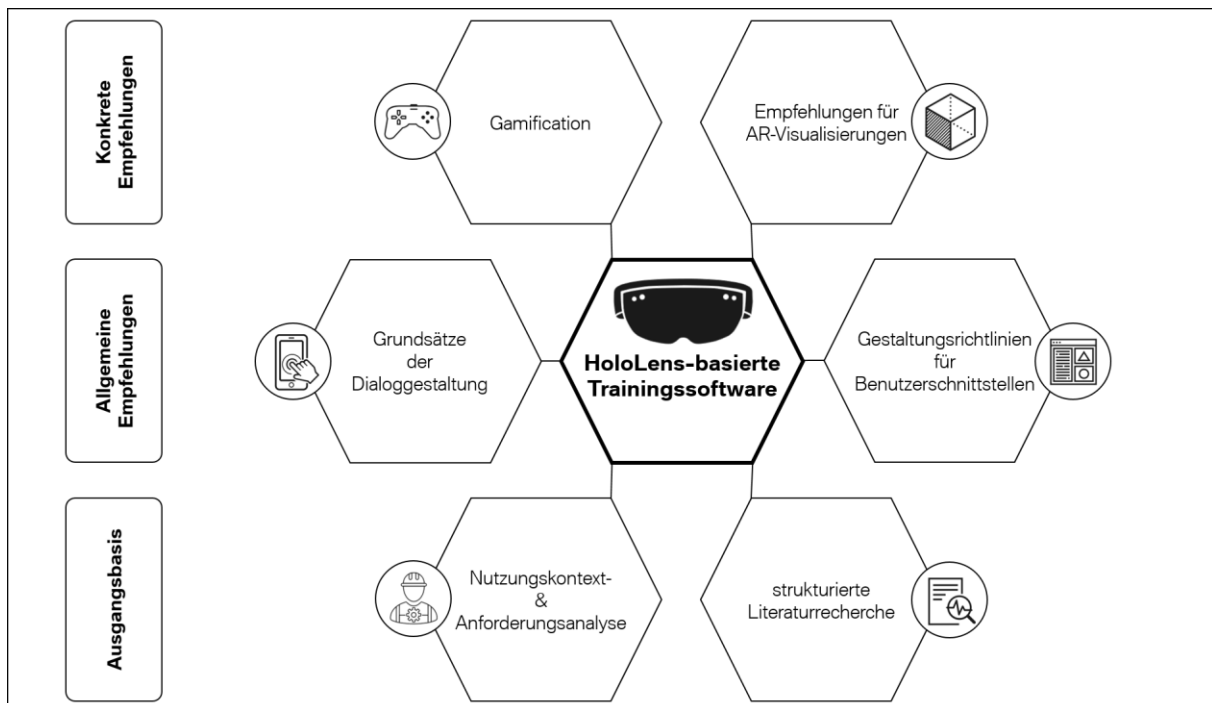


Abbildung 19: Gestaltungseinflüsse auf die HoloLens-basierte Trainingssoftware.

Quelle: eigene Darstellung.

4.4 Evaluation

Die kontinuierliche Evaluation eines interaktiven Systems wird zur Überprüfung und Optimierung der Gebrauchstauglichkeit über den gesamten Gestaltungsprozess verwendet und ist ein zentraler Bestandteil der menschenzentrierten Entwicklung. Dabei müssen die Evaluationsmethoden dem jeweiligen Kontext entsprechen und über die einzelnen Entwicklungsphasen flexibel angepasst werden [124]. Die Methodenauswahl ist zum einen abhängig vom Entwicklungsstatus des interaktiven Systems (Prototyp oder finales System) und zum anderen von den jeweiligen Testpersonen (Anwender oder Experten). Aus der strukturierten Literaturrecherche geht hervor, dass Usability-Evaluationen grundsätzlich in formative und sum-

mative Evaluationen eingeteilt werden (vgl. Abbildung 12). Die **formative Evaluation** wird frühzeitig angewandt und zielt durch iterative Evaluationszyklen darauf ab, Schwachstellen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit eines interaktiven Systems zu ermitteln und diese sukzessive zu optimieren [184]. Im Gegensatz dazu dient die nicht-iterative **summative Evaluation** zur Überprüfung des finalen Systems [187]. Diese Art der Erprobung wird typischerweise am Ende eines Produktentwicklungslebenszyklus als Vergleichstest zu einem entsprechenden Alternativprodukt durchgeführt. Auf Basis dieser grundlegenden Klassifizierung werden in den nachfolgenden Abschnitten verschiedene Anwender- und Experten-basierte Methoden vorgestellt und deren Eignung zur Evaluation von HMD-basierten Trainingsanwendungen im industriellen Nutzungskontext diskutiert.

4.4.1 Formative Evaluation

In diesem Abschnitt erfolgt die Beschreibung der wesentlichen Verfahren und Methoden, welche im Rahmen einer formativen Evaluation genutzt werden können [84].

Bei der **heuristischen Evaluation** bewerten Experten anhand von etablierten Gestaltungsrichtlinien (Heuristiken) die Gebrauchstauglichkeit eines interaktiven Systems [86]. Hierbei werden Regelverstöße aufgedeckt und gewichtet. In Abhängigkeit der Dringlichkeit können Verbesserungsvorschläge abgeleitet werden [128]. Diese Methode lässt sich bereits sehr früh im Entwicklungsprozess anwenden und gewährleistet aufgrund des vorgegebenen Rahmens eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Im Zuge der Entwicklung einer HMD-basierten Trainingsanwendung für manuelle Montagetätigkeiten lässt sich diese Methode jedoch schwer anwenden, da etablierte Heuristiken für diesen Anwendungsbereich fehlen [16]. Darüber hinaus lassen sich allgemeine Empfehlungen (vgl. Abschnitt 4.3.6) nur schwer auf die Gestaltung von HMD-basierten Bedienoberflächen und Interaktionskonzepten anwenden, da die dort auftretenden Probleme nicht eindeutig zuordenbar sind [188].

Eine Alternative bietet der **kognitive Durchgang** (engl. cognitive Walkthrough). Im Gegensatz zur heuristischen Evaluation wird bei dieser Methode kein fester Rahmen vorgegeben. Experten nehmen die Rolle eines potentiellen Benutzers ein und absolvieren chronologisch definierte Arbeitsabläufe mit einem interaktiven System [187]. Dabei bewerten sie den dafür notwendigen kognitiven Aufwand, und ob ein zukünftiger Benutzer in der Lage sein wird, die vorgegebenen Handlungsschritte auszuführen. Somit können Problemzusammenhänge identifiziert werden [128]. Jacobsen und John [189] empfehlen neben den Experten auch Personen mit verschiedenem Bildungshintergrund in die Evaluation mit einzubeziehen. Dadurch ergeben sich verschiedene Standpunkte und die Wahrscheinlichkeit steigt, mehr Usability-Fehler zu finden. Dünser und Billingham [190] zeigen auf, dass der kognitive Durchgang eine etablierte Methode für die formative Evaluation von AR-Anwendungen ist. Allerdings können sich Experten nur eingeschränkt in die Lage eines zukünftigen Benutzers versetzen [188]. Demnach sollten die Experten-basierten Evaluationsmethoden durch Nutzer-basierte Evaluationsmethoden ergänzt werden.

Hierfür bietet sich der klassische **Usability-Test** an. Bei dieser Methode absolvieren Endanwender eine für sie typische Arbeitsaufgabe unter Nutzung eines prototypischen interaktiven Systems. Dabei werden die Testpersonen in der Regel von einer weiteren Person observiert. Die Beobachtungen werden schriftlich festgehalten. Zusätzlich können Kameras und Mikrofone als Hilfsmittel zur Datenaufnahme verwendet

werden [128]. Nielsen und Landauer [191] legen dar, dass im Vergleich zu einer einzelnen Erhebung mit vielen Evaluatoren mehr Usability-Fehler gefunden werden, wenn mehrere kleine Evaluationen mit maximal fünf Testpersonen je Teilnehmergruppe durchgeführt werden. Neben der Beobachtung können weitere qualitative und quantitative Methoden innerhalb des Usability-Tests genutzt werden, um Schwachstellen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit eines interaktiven Systems zu erfassen. Die wesentlichen werden nachfolgend vorgestellt.

Benutzerinterview

Mit Hilfe eines Interviews können die Meinungen der Benutzer während oder nach der Benutzung eines interaktiven Systems erhoben werden [188]. Die Befragung erfolgt unstrukturiert, teilstrukturiert oder strukturiert (vgl. Abschnitt 4.2.4) und sollte entsprechend dem Befragungsziel angepasst werden. Dabei bilden die Beobachtungen aus dem Usability-Test eine gute Grundlage für zielgerichtete Fragen. Die Aufnahme der Verbalisierungen der Probanden kann in einfacher Form durch ein schriftliches Protokoll oder mit Hilfe eines Diktiergeräts durchgeführt werden. Die Auswertung des qualitativen Datenmaterials gibt schließlich Aufschluss über potentielle Schwachstellen in der Gebrauchstauglichkeit des Systems. Neben dem Benutzerinterview stellt die Methode des lauten Denkens (engl. Think-Aloud) eine weitere qualitative Methode dar, die sich für die formative Evaluationsphase eignet und vorwiegend als Ergänzung zum Usability-Test verwendet wird [192].

Lautes Denken

Bei dieser Methode wird ein Proband gebeten, eine vorgegebene Tätigkeit mit einem interaktiven System zu absolvieren und seine Gedanken und Gefühle zu verbalisieren. Die Verbalisierung erfolgt während der Systemerprobung (Introspektion) unmittelbar oder zeitlich verzögert nach der Aufgabenbewältigung (Retrospektion) [193]. Dadurch werden die kognitiven Prozesse einer Person sichtbar, wodurch Rückschlüsse auf mögliche Bedienprobleme geschlossen werden können [188]. Die Datenakquise wird typischerweise mit Diktiergeräten oder Videoaufnahmen sichergestellt. In einer vereinfachten Variante können auch schriftliche Notizen des Versuchsleiters hilfreich sein [194]. Konrad [193] kritisiert die Vollständigkeit des verbalen Protokolls, da Testpersonen nicht alle kognitiven Prozesse artikulieren. Er fordert daher die Ergänzung durch weitere quantitative Methoden.

Standardisierte Fragebögen

Mit standardisierten Fragebögen lässt sich das Benutzererlebnis (engl. User Experience [UX]) bei der Verwendung eines interaktiven Systems quantitativ erfassen und statistisch auswerten [188]. Dadurch wird eine hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Die DIN EN ISO 9241-210:2010 definiert das Benutzererlebnis als „Wahrnehmung und Reaktionen einer Person, die aus der tatsächlichen und/oder der erwarteten Benutzung eines Produkts, eines Systems oder einer Dienstleistung resultiert“ [20]. Dadurch wird deutlich, dass das Benutzererlebnis über die reine Nützlichkeit eines interaktiven Systems hinausgeht. Es werden Faktoren wie die „Attraktivität“, die „Originalität“ oder der „Spaß“ beim Umgang mit einem interaktiven System berücksichtigt [195]. Zur Evaluation dieser Faktoren existieren in der Literatur mehr als 24 standardisierte Fragebögen [196]. Diese unterscheiden sich teilweise grundlegend und müssen entsprechend dem Befragungsziel ausgewählt werden [197]. Im Kontext der Evaluation von AR-basierten

Anwendungen werden hauptsächlich allgemein anwendbare Fragebögen, wie die **System Usability Scale (SUS)** und der **NASA Task Load Index (NASA-TLX)**, verwendet [198].

Die **SUS** wurde von Brooke [199] entwickelt und ist ein einfacher und reliabler Fragebogen zur Gesamtbewertung der Gebrauchstauglichkeit eines interaktiven Systems. Er ist allgemein anwendbar und beschränkt seine Betrachtung nicht auf einzelne UX-Dimensionen [197]. Er besteht aus jeweils fünf abwechselnd formulierten positiven und negativen Aussagen und einer dazugehörigen fünfstufigen Likert-Skala zur Bewertung. Dabei beurteilen die Probanden die Aussagen zwischen den Extrema „vollständiger Ablehnung“ und „vollständiger Zustimmung“. Als Resultat ergibt sich ein quantitativer Messwert zwischen 0 und 100. Dieser lässt sich in eine Adjektivskala, in Schulnoten und Akzeptanzbereiche einordnen (Abbildung 20) und beschreibt die Gebrauchstauglichkeit eines Systems von sehr schlecht bis bestmöglich [200].

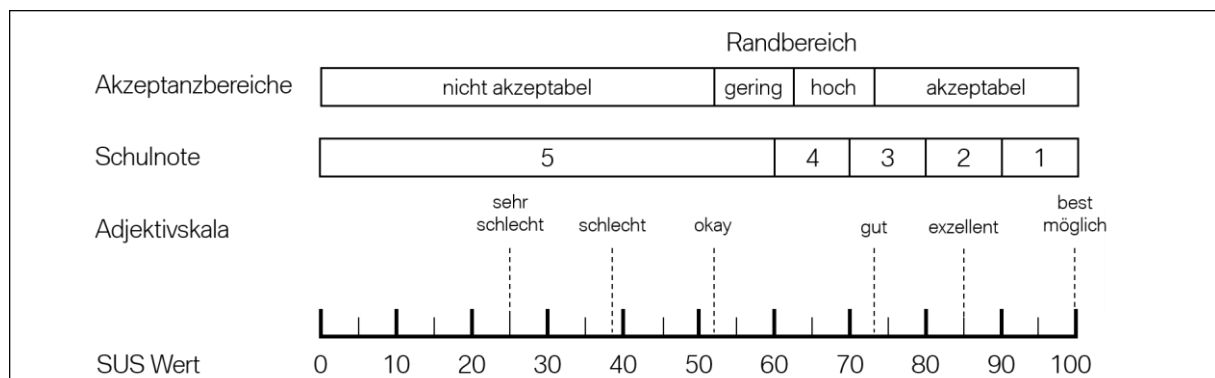


Abbildung 20: Einordnung des SUS Werts in verschiedene Bewertungsskalen.

Quelle: in Anlehnung an Bangor et al. [200].

Der **NASA-TLX** wurde von Hart und Staveland [201] entwickelt und ermöglicht die Erfassung der subjektiv wahrgenommenen Beanspruchung während oder unmittelbar nach einer Aufgabenbewältigung unter Benutzung eines interaktiven Systems. Dazu werden die geistigen, die körperlichen und die zeitlichen Anforderungen sowie eine Einschätzung der Leistung, der Anstrengung und der Frustration abgefragt. Die Bewertung jeder Frage erfolgt mit Hilfe einer Skala von 0 bis 100 in Fünferschritten. Hart [202] zeigt auf, dass der NASA-TLX ein etablierter Fragebogen in vielen verschiedenen Anwendungsdomänen ist und vorwiegend für Systemvergleiche genutzt wird.

Die beiden zuvor vorgestellten Fragebögen beschränken ihre Betrachtung auf pragmatische Qualitätsaspekte (PQ). Mit ihnen lässt sich ermitteln, ob ein interaktives System einen Nutzer effektiv und effizient bei der Bewältigung einer Arbeitsaufgabe unterstützt (z.B. Erlernen einer Montagetätigkeit). Neben der PQ hat die hedonische Qualität (HQ) eines Produkts einen entscheidenden Einfluss auf das Benutzererlebnis. Sie beschreibt die Stimulation eines Benutzers durch visuelle Gestaltungselemente (z.B. ein GUI mit modernem Design) sowie neuartige Interaktionsmodalitäten und vermittelt eine bestimmte Identität (z.B. professionell, cool, modern) [203]. Zur quantitativen Ermittlung der PQ und HQ können die Fragebögen **AttrakDiff** und der **User Experience Questionnaire (UEQ)** verwendet werden.

Der ursprüngliche **AttrakDiff** wurde von Hassenzahl et al. [204] entwickelt. Er bestimmt mit 23 gegensätzlichen Items (z.B. interessant – langweilig) die zuvor beschriebenen Produktqualitäten und die daraus resultierende Attraktivität eines Produkts. Eine Weiterentwicklung präsentieren Hassenzahl et al. [203] mit dem AttrakDiff 2. Dieser basiert auf der ursprünglichen Version und ergänzt sie um fünf weitere Adjektivpaare. Die 28 bipolaren Items beruhen auf dem Prinzip der semantischen Differentiale und werden über eine siebenstufige Likert-Skala bewertet [205]. Der Fragebogen ist über eine Internetseite¹² abrufbar und hat sich bereits bei zahlreichen wissenschaftlichen und praxisorientierten Projekten als hilfreiche Methode zur Ermittlung von UX-relevanten Produktwahrnehmungen erwiesen [206]. Der Zugang über die Internetseite hat den Vorteil, dass Testpersonen ihre Antworten direkt am PC machen können und die Auswertung der Daten automatisiert erfolgt.

Im Vergleich zum AttrakDiff, der seinen Schwerpunkt auf hedonische Qualitätsmerkmale legt, bietet der **UEQ** eine Möglichkeit zur ausgeglichenen Messung der Produktqualitäten [207]. Die ursprüngliche Langversion des UEQs beruht ebenfalls auf dem Prinzip des semantischen Differentials und besteht aus 26 bipolaren Items [208]. Schrepp et al. [209] präsentieren eine verkürzte Variante des UEQs mit nur acht gegensätzlichen Items zur Bestimmung der pragmatischen und hedonischen Qualität. Dadurch lässt sich die Zeit zur Beantwortung des Fragebogens verkürzen. Dieser muss zur Befüllung allerdings auf Papier ausgedruckt und von der jeweiligen Testperson händisch ausgefüllt werden. Die Daten können im Anschluss vom Versuchsleiter in ein allgemein zugängliches Datenanalysetool übernommen werden, welches die Auswertung übernimmt [197].

4.4.2 Summative Evaluationsphase

Im Gegensatz zur formativen Evaluation, welche das Ziel einer iterativen Systemverbesserung verfolgt, hat die summative Evaluation eine Kontroll- und Legitimationsfunktion [21]. Mit Hilfe von quantitativen Messgrößen wird das finale gebrauchstaugliche System abschließend bewertet. Die Ergebnisse können statistisch ausgewertet werden (z.B. mit der Software IBM SPSS Statistics) und gewährleisten eine hohe Vergleichbarkeit. Diese abschließende Erprobung kann als **A/B Test** oder **multivariater Test** ausgeführt werden [128]. Während der A/B Test bzw. univariate Test zwei „Alternativen im Vergleich zueinander getestet“, werden beim multivariaten Test mehrere Optionen miteinander verglichen [128]. Dafür können sowohl objektive als auch subjektive Messgrößen erhoben werden.

4.4.3 Explikation der Evaluationsmethodik

Die beschriebenen Evaluationsphasen (formative/ summative) müssen im Zuge der Entwicklung einer HMD-basierten Trainingssoftware nacheinander aufbauend durchlaufen werden. Dadurch wird zunächst die Gebrauchstauglichkeit des interaktiven Systems sukzessive erhöht und abschließend ein quantitativer Wirksamkeitsnachweis geliefert, welcher eine zentrale Anforderung der Anwendungsdomäne ist (vgl. Tabelle 11). Innerhalb der einzelnen Phasen können verschiedene Methoden verwendet werden, um objektive und subjektive Messgrößen zu erheben. Im Kontext der Evaluation von AR-basierten Assistenzsystemen werden typischerweise die Zeit und die Fehler zur Bewältigung von bestimmten Teilschritten oder

¹² www.attrakdiff.de

einer ganzen Arbeitsaufgabe gemessen [187]. Ergänzend dazu können mit den zuvor vorgestellten Fragebögen subjektive Messgrößen, wie pragmatisch/ergonomische und hedonische Qualitätsaspekte, erhoben werden. Entsprechend der Evaluationsphase und dem Untersuchungsziel müssen die Methoden ausgewählt werden. Dabei muss die Forderung der Anwendungsdomäne (vgl. Tabelle 11), ressourcenschonende Methoden zu verwenden, berücksichtigt werden. Die nachfolgende Tabelle 15 gibt Aufschluss über die Bewertung der einzelnen Methoden hinsichtlich der genannten Kriterien.

Tabelle 15: Methoden zur Evaluation von HMD-basierten Trainingsanwendungen.

Quelle: eigene Darstellung.

Methode		Evaluation		Messgrößen				Aufwand		
		Geeignet für formative Evaluation	Geeignet für summative Evaluation	objektiv		subjektiv		Ressourcenschonender Personenaufwand	Ressourcenschonender Zeitaufwand	Ressourcenschonender Kostenaufwand
				Effektivität - Fehler-	Effizienz - Zeit-	Pragmatische Qualität	Hedonische Qualität			
Heuristische Evaluation	---	○	○	○	○	●	●	●	●	●
Kognitiver Durchgang	---	●	○	○	○	●	●	●	●	●
Usability Test	Beobachtung	●	●	●	●	●	○	●	●	●
	Interview	●	●	○	○	●	●	●	●	●
	Lautes Denken	●	○	○	○	●	●	●	●	●
	SUS	●	●	○	○	●	○	●	●	●
	NASA-TLX	●	●	○	○	●	○	●	●	●
	AttrakDiff	●	●	○	○	●	●	●	●	●
	UEQ	●	●	○	○	●	●	●	●	●
Bedingung erfüllt		Bedingung teilweise erfüllt		Bedingung nicht erfüllt						
Legende		●	●	○	○	○	○	○	○	○

Die heuristische Evaluation und der kognitive Durchgang zählen zu den Experten-basierten Untersuchungen und werden in der Regel für die formative Evaluationsphase verwendet, um Schwachstellen in der Gebrauchstauglichkeit eines interaktiven Systems zu ermitteln (vgl. Abbildung 12). In beiden Verfahren nehmen Usability-Experten die Rolle eines potentiellen Benutzers ein und absolvieren typische Handlungsabläufe mit dem interaktiven System. Die Verfahren sind ressourcenschonend, da außer den Experten keine weiteren Testpersonen (z.B. Mitarbeiter eines Unternehmens) oder eine speziell ausgestattete

Versuchsumgebung notwendig sind [128]. Im Kontext der Evaluation einer HMD-basierten Trainingssoftware eignet sich die heuristische Evaluation aufgrund der fehlenden Heuristiken nicht [16]. Diese müssen als Bewertungsgrundlage vorhanden sein (vgl. Abbildung 12). Der kognitive Durchgang bietet sich aufgrund des nicht fest vorgegebenen Evaluationsrahmens als Alternative dazu an. Allerdings ist dieses Verfahren nur bedingt anwendbar, weil Experten fehlen, die Erfahrung im Bereich der Gebrauchstauglichkeit von HMD-basierten Trainingsanwendungen aufweisen.

Demnach bietet sich der klassische Anwender-basierte Usability-Test für die Evaluation der HoloLens-basierten Trainingsanwendung an. Bei diesem Verfahren nutzen potentielle zukünftige Benutzer das Trainingssystem. Dabei werden sie von einem Evaluator observiert, der seine Beobachtungen schriftlich protokolliert. Im Kontext der manuellen Montage werden typischerweise die Zeit zur Bewältigung der einzelnen Montageschritte und die Fehler, die der Proband während des Montageprozesses verursacht, festgehalten [12]. Durch die objektiven Messgrößen können Rückschlüsse auf die pragmatische Qualität des Trainingssystems geschlossen werden. Eine Aussage zur hedonischen Qualität lässt sich allerdings durch eine reine Beobachtung nicht treffen. Dafür eignet sich die Methode des lauten Denkens. Diese sollte im Kontext der manuellen Montage allerdings nicht simultan zur Handlungsausführung (Introspektion) erfolgen, da dies die Erfassung der objektiven Messgrößen beeinflussen kann. Eine zeitlich versetzte Verbalisierung der Gedanken und Gefühle im Anschluss an die Tätigkeit bietet sich daher an. Knorr und Schramm [210] bezeichnen das als „Lautes Erinnern“. Ergänzend dazu können Interviews mit den Testpersonen durchgeführt werden, um die Gedankenprozesse und Handlungen während der Problemlösung zu rekonstruieren [211].

Mit den zuvor genannten Methoden (Beobachtung, lautes Denken, Interview) lassen sich die PQ und HQ qualitativ ermitteln. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, sollten diese durch quantitative Methoden ergänzt werden. Die SUS bietet sich durch ihre einfache ressourcenschonende Anwendung für die Erhebung der pragmatischen Qualität an. Zusätzlich kann der NASA-TLX verwendet werden, um die subjektiv wahrgenommene Beanspruchung nach Ausführung des Montagetrainings zu ermitteln. Der AttrakDiff kann ergänzend dazu verwendet werden, um hedonische Faktoren (z.B. die Attraktivität) zu erheben. Durch den einfachen Online-Zugang zum Fragebogen und der automatisierten Auswertung hat der AttrakDiff einen Vorteil gegenüber dem UEQ.

Pranoto et al. [212] legen dar, dass die Verwendung von mehreren Evaluationsmethoden zu einem valideren Messergebnis und einem höheren Erkenntnisgewinn führt. Demnach werden die verschiedenen Methoden innerhalb der einzelnen Ablaufphasen als Mix angewandt. Der Ablauf der formativen sowie summativen Evaluation orientiert sich an dem Vorschlag von Gabbard et al. [84], welche die Erprobung in jeweils fünf Schritte einteilen. Im ersten Schritt erfolgt die Festlegung einer Arbeitsaufgabe (I). Diese resultiert aus dem hierarchischen Strukturbaum der Anforderungsanalyse (vgl. Abschnitt 4.2.5). Mit dem Ziel eine prozedurale Tätigkeit zu erlernen, absolviert ein Proband im zweiten Schritt (II) die vorgegebene Arbeitsaufgabe mit der HMD-basierten Trainingssoftware. Im Rahmen der Evaluation AR-basierter Trainingssysteme wird ein Proband gewöhnlich gebeten, die erlernte Tätigkeit ohne jegliche Unterstützung zu wiederholen (vgl. Abschnitt 3.3.3). Währenddessen dieser zwei Montagephasen (Trainings- und Testphase) erheben die Evaluatoren im dritten Schritt verschiedene Daten (III). Die objektiven Messgrößen

(Zeit und Fehler) werden während der Montage ermittelt und protokolliert. Nach Beendigung der Arbeitsaufgabe äußern die Probanden ihre Gedanken und Gefühle (Lautes Erinnern). Die Verbalisierungen können über ein Diktiergerät aufgenommen oder schriftlich festgehalten werden. Ergänzt werden kann das verbale Protokoll durch gezieltes Nachfragen des Interviewers. Im letzten Teil der Datenaufnahme werden die Fragebögen nacheinander von den Probanden ausgefüllt. Die Auswertung der gesammelten Daten erfolgt im vierten Schritt (IV). Auf Basis dieser Erkenntnisse ergeben sich Optimierungspotentiale, die im letzten Schritt zur Systemanpassung führen (V). Dieser Vorgang wird iterativ solange durchgeführt, bis die HMD-basierte Trainingsanwendung eine ausreichende Gebrauchstauglichkeit aufweist.

Im Anschluss daran erfolgt die summative Evaluation der gebrauchstauglichen HMD-basierten Trainingsanwendung. Zunächst wird adäquat zur formativen Evaluation die Arbeitsaufgabe festgelegt (VI), welche aus dem hierarchischen Strukturbaum der Analysephase resultiert. Nach diesem absolvieren die Testpersonen die einzelnen Arbeitsschritte mit dem AR-basierten Trainingssystem und weiteren Alternativprodukten (VII). Als Alternativprodukt für die vergleichenden Tests kommen typischerweise Papieranleitungen zum Einsatz, nach denen die Probanden einen Montageprozess absolvieren [213]. Ergänzend dazu sollte das Training unter Anweisung einer erfahrenen Person (engl. Training-on-the-Job) als Alternative zum Erlernen von manuellen Montageabläufen berücksichtigt werden, da es eine etablierte Methode im industriellen Kontext darstellt [214]. Während der Handlungsausführung (Trainings- und Testphase) werden die Zeit zur Bewältigung der Arbeitsaufgabe und die Fehler vom Evaluator protokolliert (VIII). Im Anschluss daran können die Probanden zu ihren Erfahrungen während der Nutzung befragt werden. Um die Systeme vergleichen zu können, sollte die Befragung als Leitfaden gestütztes Interview und in Form der zuvor genannten Fragebögen erfolgen. Dadurch können sowohl die objektiven Messgrößen als auch die subjektiven Messgrößen der einzelnen Systeme miteinander verglichen werden. Die Auswertung der Daten (IX) liefert schließlich den Wirksamkeitsnachweis des AR-basierten Trainingssystems und gibt Aufschluss darüber, ob sich das System zum Erlernen manueller Montagefähigkeiten eignet, oder ob die alternativ getesteten Anlernmethoden besser sind (X). Die nachfolgende Abbildung 21 fasst das beschriebene Vorgehen zur Evaluation zusammen.

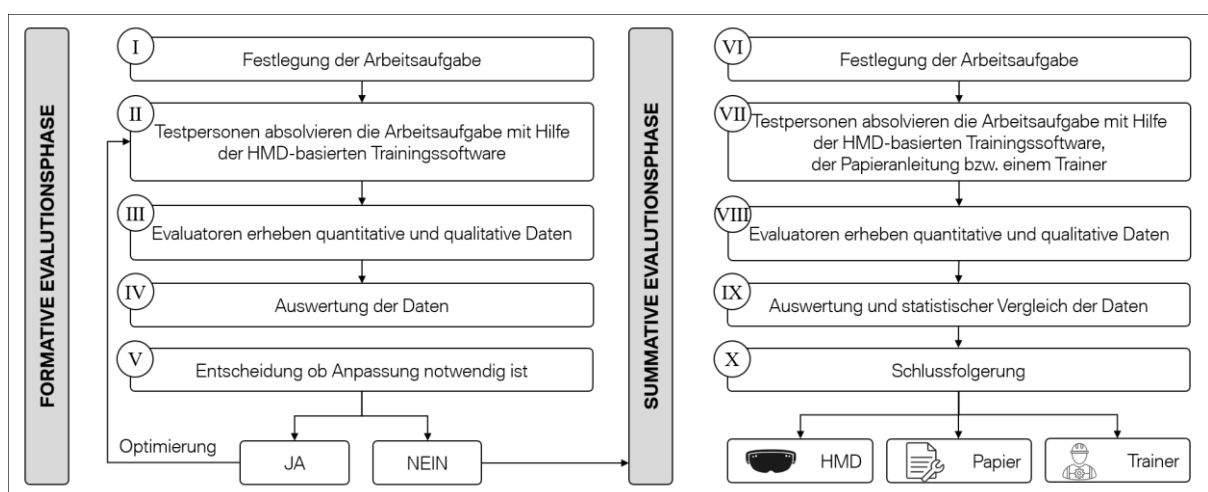


Abbildung 21: Formative und Summative Evaluation der HMD-basierten Trainingsanwendung.

Quelle: in Anlehnung an Gabbard et al. [84].

4.5 Zusammenfassung des Kapitels

Das Ziel dieses Kapitels war die systematische Erarbeitung eines Vorgehensmodells zur Gestaltung gebrauchstauglicher AR-basierter Trainingssysteme für manuelle Montagetätigkeiten. Hierzu wurden zunächst die Grundlagen der menschenzentrierten Entwicklung von interaktiven Systemen beschrieben. Bei dieser Art der Systemgestaltung stehen die Nutzer im Mittelpunkt und werden frühzeitig in die Gestaltung mit einbezogen. Das grundlegende Vorgehen gliedert sich dabei in drei Phasen.

In der ersten Phase erfolgt die Analyse des Kontext und der Nutzeranforderungen. Hierzu wurden verschiedene Methoden vorgestellt und deren Eignung für den industriellen Anwendungskontext diskutiert. Auf Basis der Anforderungen der Anwendungsdomäne (vgl. Abschnitt 3.4) wurden geeignete Methoden ausgewählt und zu einer Analysemethodik zusammengefasst. Diese setzt sich aus den Schritten Verstehen des Nutzungskontext (**I**), Erhebung der Nutzeranforderungen (**II**) und einer Ergebnisanalyse (**III**) zusammen. Für die Analyse des Nutzungskontexts müssen zunächst relevante Dokumente gesichtet werden. Im Kontext der manuellen Montage sind das typischerweise Standardarbeitsanweisungen. Darin sind die einzelnen Montageschritte und deren Reihenfolge definiert. Ergänzt wird die Dokumentenanalyse durch eine direkte Beobachtung der Nutzer und eine aktive Teilnahme im Nutzungskontext. Hierzu begibt sich der Produktverantwortliche an einen ausgewählten Montagearbeitsplatz und durchläuft den standardmäßigen Trainer-basierten Anlernprozess. Aus den Erkenntnissen lässt sich schließlich ein Interviewleitfaden ableiten. Dieser orientiert sich an den Leitfragen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH [134] und den Trigger-Fragen des Value Proposition Design [135]. Der Interviewleitfaden dient als Grundlage zur Erhebung der Nutzeranforderungen. Hierzu müssen teilstrukturierte Interviews mit 10-15 Personen aus der Anwendungsdomäne durchgeführt werden. Die daraus resultierenden Anforderungen werden im dritten Schritt analysiert und liefern einen hierarchischen Strukturbaum. In diesem sind die typischen Aufgaben, Meinungen, Wünsche sowie Bedürfnisse der Nutzer aufgezeigt und strukturiert.

Darauf aufbauend erfolgt in der zweiten Phase die Gestaltung des Trainingssystems. Hierzu wird die Methode des Prototypings (**IV**) genutzt und ein erster funktionsfähiger Demonstrator (high-fidelity Prototyp) entwickelt. Dieser sollte bereits viele Funktionalitäten und ein ausgereiftes Design besitzen. Dadurch können wertvolle Informationen bei der Erprobung gewonnen werden, die zu einer verbesserten Systemneugestaltung führen. Mit dem Ziel, ein gebrauchstaugliches System zu gestalten, sollten beim Prototyping verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Dazu zählen die Erkenntnisse aus der Nutzungskontext/Anforderungsanalyse und das Wissen aus der strukturierten Literaturrecherche (vgl. Abschnitt 3.3.1) sowie die Empfehlungen von Navab [81], Regenbrecht et al. [91] und Webel et al. [92]. Darüber hinaus sollten die im Abschnitt 4.3 darlegten Gestaltungshinweise Anwendung bei der Entwicklung der HMD-basierten Trainingssoftware finden. Hierzu wurden die allgemeinen Grundsätze der Dialoggestaltung, konkrete Empfehlungen für die Gestaltung von Benutzerschnittstellen, Hinweise zur Visualisierung von augmentierten Informationen für manuelle Montageanwendungen und das Konzept der Gamification näher erläutert.

Die Evaluation des high-fidelity Prototyps erfolgt in der dritten Phase und gliedert sich in eine formative (V) und eine summative (VI) Evaluation. Während der formativen Evaluation wird das System von verschiedenen Personengruppen im Rahmen von Usability-Tests erprobt, bewertet und systematisch weiterentwickelt. Im Gegensatz dazu wird in der summativen Evaluation das finale System einem Vergleichstest unterzogen. Dabei testen potentielle Nutzer das entwickelte Trainingssystem und bewerten es gegenüber einem (A/B Test) oder mehreren Vergleichsprodukten (multivariater Test). Im Rahmen dieser Dissertation dienen eine Papieranleitung mit Schritt-für-Schritt Anweisungen und das klassische Trainerbasierte Anlernen als Alternative zu dem AR-basierten Trainingssystem. Innerhalb der beiden Evaluationsphasen können verschiedene Methoden zur Anwendung kommen. Diese sind zum einen vom Reifegrad des Trainingssystems (früher Prototyp oder finales System) und zum anderen von den Testpersonen (Experten oder Anwendern) abhängig. Hierzu wurden verschiedene Methoden vorgestellt und deren Eignung zur Evaluation von AR-basierten Trainingssystemen im industriellen Nutzungskontext diskutiert. Mit dem Ziel möglichst viele UX-Dimensionen durch die Evaluationen zu erfassen und ressourcenschonende Methoden zu verwenden, wurden sowohl qualitative als auch quantitative Methoden ausgewählt und als Methodenmix zusammengefasst. Dadurch lassen sich sowohl objektive Messgrößen, wie die Zeit zur Bewältigung des Montagetrainings und die Fehler der Probanden, als auch subjektive Messgrößen, wie die pragmatische (PQ) und die hedonische Qualität (HQ) erfassen. Diese dienen innerhalb der formativen Evaluation zur Identifikation von Systemschwachstellen, welche durch iterative Optimierungsschleifen sukzessive behoben werden. Im Rahmen der summativen Evaluation werden die genannten Messgrößen genutzt, um die verschiedenen Trainingslösungen (HMD, Papieranleitung, Trainer) miteinander zu vergleichen. Die Auswertung der Ergebnisse liefert schließlich einen quantitativen Wirksamkeitsnachweis und gibt Aufschluss über die Eignung eines AR-basierten Trainingssystems zum Erlernen manueller Montagetätigkeiten im industriellen Nutzungskontext.

Das in diesem Kapitel erarbeitete Vorgehensmodell stellt das erste Artefakt dieser Dissertation dar (vgl. Abschnitt 2.2). Durch eine menschenzentrierte Vorgehensweise und eindeutige Methodenbeschreibung werden die Anforderungen der Praxis und der Literatur adressiert (vgl. Abschnitt 3.5). Dadurch wird eine reproduzierbare Analyse, Gestaltung und Evaluation von AR-basierten Trainingssystemen gewährleistet und eine Antwort auf die zweite Forschungsfrage geliefert:

Welche Methoden, Modelle und Theorien sollte ein Vorgehensmodell zur Gestaltung gebrauchstauglicher industrieller AR-basierter Trainingssysteme enthalten?

Die nachfolgende Abbildung 22 fasst die einzelnen Schritte und den Ablauf des zuvor beschriebenen Vorgehensmodells zur Gestaltung AR-basierter Montagetrainingsysteme in sechs Schritten mit den entsprechenden Methoden und Gestaltungseinflüssen schematisch zusammen.

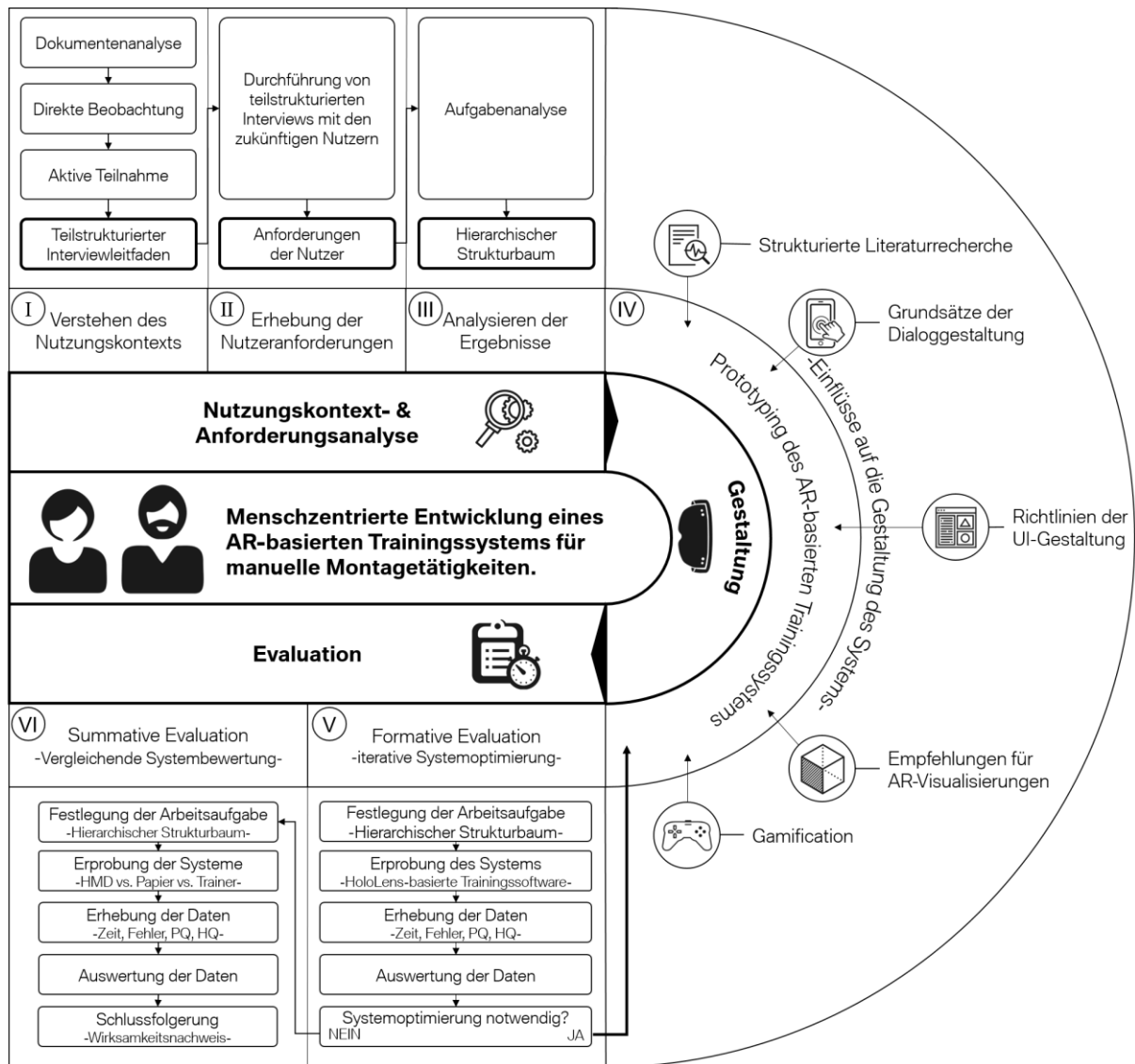


Abbildung 22: Vorgehensmodell zur Gestaltung AR-basierter Montagetrainingssysteme.

Quelle: eigene Darstellung.

5 Anwendung des Vorgehensmodells

“I hear and I forget. I see and I remember. I do and I understand”

Konfuzius, Philosoph

Die iterative Gestaltung und Evaluation eines Artefakts unter Berücksichtigung stringenter wissenschaftlicher Methoden ist eine grundlegende Forderung der gestaltungsorientierten Forschung (Abbildung 5). Ohne eine geeignete Evaluation gelten Artefakte lediglich als ungetestete Theorien, Vermutungen und Hypothesen, da keine Gültigkeitsbeweise für sie vorliegen [30]. Aufgrund dessen wird das zuvor erarbeitete Vorgehensmodell, welches das erste Artefakt dieser Dissertation darstellt, in diesem Kapitel zur Anwendung gebracht. Dadurch wird dessen Nützlichkeit überprüft. Die daraus resultierenden Erkenntnisse geben Aufschluss über die Eignung der einzelnen Methoden und Gestaltungsempfehlungen des Vorgehensmodells.

Zu Beginn dieses Kapitels erfolgt die Nutzungskontext- und Anforderungsanalyse an einem ausgewählten Montagearbeitsplatz in der Automobilindustrie. Dafür wird das im Abschnitt 4.2 erarbeitete Analysevorgehen verwendet (vgl. Abbildung 16). Im Anschluss daran erfolgt die Instanziierung des AR-basierten Trainingssystems unter Berücksichtigung der verschiedenen Gestaltungseinflüsse, welche im Abschnitt 4.3.7 beschrieben wurden. Dieses interaktive Trainingssystem bildet das zweite Artefakt dieser Dissertation (vgl. Abbildung 6). Im Anschluss daran wird das System, insbesondere die Trainingssoftware, im Rahmen formativer Evaluationen erprobt und systematisch optimiert. Eine abschließende formative Evaluation bewertet die finale HMD-basierte Trainingsanwendung im Vergleich zu einem Papier-basierten Anlernkonzept und dem klassischen Trainer-basierten Anlernen. Für die Evaluationsphasen wird das im Abschnitt 4.4 erarbeitete Versuchsdesign verwendet (Abbildung 21). Auf Basis der Erkenntnisse und Erfahrungen, welche aus der Evaluation des ersten und zweiten Artefakts resultieren, werden am Ende dieses Kapitels verschiedene Empfehlungen dargelegt. Sie bilden das dritte und letzte Artefakt dieser Dissertation.

5.1 Nutzungskontext- & Anforderungsanalyse

In diesem Abschnitt wird der Nutzungskontext beschrieben in dem das AR-basierte Trainingssystem Anwendung finden soll. Darüber hinaus werden die Anforderungen der zukünftigen Benutzer erhoben. Die nachfolgenden Abschnitte geben Auskunft über das verwendete Versuchsdesign, den Versuchsablauf, die Versuchsteilnehmer und die Ergebnisse der Erhebung.

5.1.1 Versuchsdesign

Das Versuchsdesign dieser Studie orientiert sich an dem im Abschnitt 4.2 dargelegten Analysevorgehen (vgl. Abbildung 16) und gliedert sich in drei Phasen. In der ersten Phase wird der Nutzungskontext beschrieben. Hierzu werden relevante Standardarbeitsanweisungen gesichtet, direkte Beobachtungen im Feld durchgeführt und aktiv am Montageprozess teilgenommen. Daraus resultieren Erkenntnisse (E), die den Nutzungskontext detailliert beschreiben. Darauf aufbauend wird ein teilstrukturierter Fragebogen erstellt, der sich an den Leitfragen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH [134] und den Trigger-Fra-

gen des Value Proposition Designs [135] orientiert. Dieser Fragebogen dient als Grundlage für die teilstrukturierten Interviews zur Erhebung der Nutzeranforderungen, welche in der zweiten Phase ermittelt werden. Die Verbalisierungen der Benutzer werden mit einem Diktiergerät aufgenommen, anschließend transkribiert und ausgewertet. Dabei richtet sich die Transkription nach dem Vorgehen von Dresing und Pehl [138] und die Analyse der qualitativen Daten nach dem induktiven Vorgehen der TBCA (vgl. Abschnitt 4.2.5). Daraus resultieren funktionale (FA) und nicht-funktionale Anforderungen (NFA) an die Gestaltung des AR-basierten Trainingssystems. Aus den gesammelten Erkenntnissen der Nutzungskontextanalyse und den Nutzeranforderungen lässt sich schließlich ein hierarchischer Strukturbaum ableiten, der Tätigkeiten aufzeigt, die durch das AR-basierte Trainingssystem unterstützt werden sollen.

5.1.2 Versuchsablauf

Vor Beginn der Analyse werden verschiedene Führungskräfte aus unterschiedlichen Montagebereichen der BMW Group und die dafür zuständigen Betriebsräte per E-Mail kontaktiert, um Termine zu vereinbaren, in denen das Forschungsvorhaben näher erläutert wird. Es gilt dabei, einen Bereich mit einer möglichst geringen Geheimhaltungsstufe zu finden, sodass die Forschungsergebnisse ohne größere Restriktionen veröffentlicht werden können. Das ist eine zentrale Forderung der gestaltungsorientierten Forschung (vgl. Abbildung 5). Darüber hinaus fordern die verantwortlichen Betriebsräte eine Abstimmung vor Versuchsbeginn, um beispielsweise sicherzustellen, dass Interviews anonymisiert durchgeführt werden (vgl. Tabelle 11).

Nachdem die Zustimmung zur Durchführung der Versuche erteilt wurde und die Zugänglichkeit gewährleistet ist, kann die Analyse beginnen. Hierzu werden zunächst die Standardarbeitsanweisungen des ausgewählten Montagebereichs gesichtet. Diese können über ein Dokumentenmanagementsystem abgerufen werden und geben Auskunft über die sequentiellen Hauptaufgaben (Anzahl und Reihenfolge der Montageschritte) der einzelnen Arbeitsplätze einer Montagelinie. Vor dem Hintergrund den Nutzern eine größtmögliche Anlernunterstützung durch das AR-basierte Trainingssystem zu bieten, wird eine komplexe Montagetätigkeit ausgewählt. Diese sollte so komplex sein, dass sie ohne Unterstützung nicht zu erlernen ist und der Einsatz eines interaktiven Trainingssystems einen potentiellen Mehrwert bietet. In Anlehnung an Webel et al. [65] sollte eine Montagetätigkeit, die durch ein AR-basiertes Trainingssystem unterstützt wird, mindestens sechs Hauptaufgaben (Montageschritte) mit 25 Teilaufgaben enthalten.

Im Anschluss an die Dokumentenanalyse erfolgt die direkte Beobachtung im Nutzungskontext. Dazu begibt sich der Produktverantwortliche an den ausgewählten Montagearbeitsplatz und observiert die Personen (Trainer und Trainee) während des Anlernprozesses. Die Beobachtungen werden handschriftlich festgehalten. Komplettiert wird die Nutzungskontextanalyse durch eine aktive Teilnahme im Feld. Nach Abstimmung mit dem zuständigen Produktionsverantwortlichen (z.B. dem Meister der Produktionslinie) begibt sich der Produktverantwortliche an den ausgewählten Montagearbeitsplatz und absolviert den Anlernprozess. Dabei wird er von einer zweiten Person observiert, die ihre Beobachtungen schriftlich dokumentiert. Aus der Dokumentenanalyse und den gesammelten Beobachtungen ergibt sich schließlich die Beschreibung des Nutzungskontexts. Diese enthält Informationen zu den Benutzern mit ihren Merkmalen

und ihren Aufgaben sowie eine Beschreibung der Umgebung. Auf Basis der gesammelten Erkenntnisse wird ein teilstrukturierter Fragebogen zur Erhebung der Nutzungsanforderungen abgeleitet.

Für die Interviews werden zehn Personen über die zuständigen Führungskräfte des ausgewählten Montagebereichs rekrutiert. Diese werden auf Basis ihrer Mitteilungsfreudigkeit/Gesprächsbereitschaft ausgewählt. Während der Befragung werden die Versuchsteilnehmer durch einen Springer abgelöst. Die Interviews werden in einem separaten Raum, in ruhiger Atmosphäre von dem Produktverantwortlichen durchgeführt. Dabei wird allen Befragten zunächst klar gemacht, dass der Interviewer das Montagetraining mit seinen Stärken und Schwächen verstehen will, um dieses gegebenenfalls durch den Einsatz eines AR-basierten Trainingssystems zu optimieren. Zu Beginn des Interviews werden alle Probanden gefragt, ob sie mit der Aufnahme durch ein Diktiergerät einverstanden sind. Dadurch lassen sich die Aussagen der Probanden unverzerrt aufnehmen und einfach auswerten. Danach startet die Befragung mit der Erhebung der demografischen Daten der Probanden (Geschlecht, Alter, Erfahrung mit Montage), gefolgt von den Fragen des erstellten Fragebogens in chronologischer Reihenfolge. Die Verbalisierungen werden dabei mit einem Diktiergerät aufgenommen sowie im Anschluss transkribiert und ausgewertet. Aus den gesammelten Erkenntnissen werden schließlich funktionale und nicht-funktionale Anforderungen an die Gestaltung des Trainingssystems abgeleitet.

Im letzten Schritt erfolgt die Aufgabenanalyse am Beispiel einer selektierten Montagesequenz. Dabei werden die Aufgaben der Personen analysiert und in Teilaufgaben zerlegt. Als Grundlage dazu dient die Analyse der Standardarbeitsanweisungen. Hieraus resultieren die Hauptaufgaben der Personen. Die Teilaufgaben ergeben sich durch die Beobachtungen und aktive Teilnahme im Feld. Die Anforderungen der zukünftigen Benutzer geben schließlich Auskunft darüber, welche Tätigkeiten durch das AR-basierte Trainingssystem unterstützt werden sollen. Die Ergebnisse werden in einem hierarchischen Strukturbaum zusammengefasst dargestellt.

5.1.3 Versuchsteilnehmer

An den teilstrukturierten Interviews nehmen 10 Personen teil (7 männlich, 3 weiblich). Dies entspricht der prozentualen Geschlechterverteilung der ausgewählten Montagelinie. Die Teilnahme aller Probanden erfolgt freiwillig und anonym. Alle Personen sind Beschäftigte der BMW Group am Standort München und arbeiten zwischen einem und 30 Jahren ($M=12,7$; $SD=11,7$) in der Motorenmontage. Das Alter der Versuchsteilnehmer schwankt zwischen 19 und 54 Jahren ($M=33,7$; $SD=11,8$).

5.1.4 Ergebnisse der Nutzungskontextanalyse

Die Zugänglichkeit wurde für eine Motormontagelinie im Werk München der BMW Group erteilt und alle relevanten Dokumente zur Beschreibung des Nutzungskontexts begutachtet, die Montagelinie besichtigt sowie der Anlernprozess an einem beispielhaften Arbeitsplatz absolviert. Die daraus resultierenden Erkenntnisse wurden analysiert und in Anlehnung an die DIN EN ISO 9241-210:2010 in die Kategorien Benutzer, Merkmale der Benutzer, Ziele der Benutzer und Arbeitsumgebung eingeteilt [20]. Informationen hinsichtlich dieser Kategorien sind notwendig, um den Nutzungskontext ausreichend detailliert zu beschreiben. Die nachfolgende Tabelle 16 fasst die Erkenntnisse zusammen.

Tabelle 16: Erkenntnisse der Nutzungskontextanalyse.

Quelle: eigene Darstellung.

Erkenntnisse	Beschreibung
E1: Benutzer	In der Montagelinie montieren zwölf Personen zur gleichen Zeit an unterschiedlichen Arbeitsplätzen verschiedene Motoren. Diese Personen stellen die potentiellen Benutzer des zukünftigen AR-basierten Trainingssystems dar.
E2: Merkmale der Benutzer	In der Montagelinie arbeiten 70% Männer und 30% Frauen im Dreischichtbetrieb. Einige von ihnen haben einen Migrationshintergrund (z.B. Polen, Russland). Die Ausbildung der Personen (Trainees) erfolgt direkt in der Produktionslinie mit einem Trainer (On-the-Job-Training). Der Trainer ist eine erfahrene taktgebundene Person, die für die Zeit des Anlernens ihren eigentlichen Arbeitsplatz (AP) verlässt und von einem Springer ersetzt wird.
E3: Ziele der Benutzer	Das Gesamtziel der Benutzer ist es, sieben verschiedene Motoren in einer vorgegebenen Zeit und Montage-reihenfolge fehlerfrei zu montieren. Dafür werden unterschiedliche Werkzeuge verwendet, die zwischen den einzelnen Montageschritten gewechselt werden (z.B. Austausch eines Schrauber-Aufsatzes). Die notwendigen Teile werden aus den entsprechenden Vorratsbehältern, welche in einem Regal angeordnet sind, entnommen. Die Motormontage beginnt am ersten AP (Takt 1) und endet am zwölften AP (Takt 12). Eine besonders herausfordernde Montage ist die des BMW Reihensechszylinder-Motors (B58) am ersten AP. Ein Trainee muss dabei 15 Hauptaufgaben mit 65 einzelnen Montageschritten erlernen. Dafür ist ein intensives Training nötig. Dieses orientiert sich an einem standardisierten vierstufigen Vorgehen [4]. Im ersten Schritt erfolgt die Vorbereitung. Dabei muss der Trainee zunächst eine Sicherheitsunterweisung absolvieren, um ein gefahrloses Arbeiten zu gewährleisten. Danach erklärt der Trainer dem Trainee die zu erlernende Arbeitsaufgabe und vermittelt alle notwendigen Details. Im zweiten Schritt montiert der Trainer im laufenden Produktionsbetrieb den Motor und erläutert dabei jeden Schritt. Der Trainee schaut dabei zu. Im dritten Schritt wiederholt der Trainee den Montageprozess. Der Trainer unterstützt, gibt Feedback und korrigiert bei Bedarf. Nachdem der Trainee in der Lage ist, den Motor korrekt und in der vorgegebenen Zeit zu montieren, darf er selbstständig arbeiten. Im vierten und letzten Schritt wird der Trainee vom Trainer in regelmäßigen Abständen kontrolliert.
E4: Umgebung	Die Montagelinie befindet sich im Werk München der BMW Group. Sie besteht aus zwölf Arbeitsplätzen (APs), die nacheinander in einer Fließbandfertigung angeordnet sind. Es werden sieben verschiedene Motoren in der Linie montiert. An jedem AP befindet sich eine Person, die an zwei Motoren gleichzeitig arbeiten kann [4]. An jedem AP ist ein Monitor installiert, der eine bis zu dreizehnstellige Kombination aus Zahlen und Buchstaben anzeigt. Diese werden zur Identifikation der zu montierenden Bauteile verwendet. Die Teile befinden sich in einem Regal mit Vorratsbehältern, welche mit den entsprechenden Bezeichnungen beschriftet sind. Zusätzlich zu dem Monitor befindet sich an jedem AP ein laminiertes Standardarbeitsblatt (SAB). Darin sind die Hauptaufgaben in chronologischer Reihenfolge für die jeweiligen Motoren aufgelistet. Dadurch sollen die Montagearbeiter einen Gesamtüberblick über die Montagetätigkeit erhalten. Neben den unterstützenden Hilfsmitteln werden verschiedene Werkzeuge zur Montage verwendet. Hierzu gehören beispielsweise intelligente Schrauber mit Drehmomenten-Überwachung.

In Bezug auf die zuvor vorgestellten Erkenntnisse lässt sich ein Fragebogen ableiten. Die darin enthaltenen Fragen orientieren sich an den Leitfragen der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH [134], welche diese in die Kategorien Einleitung, Voraussetzung, Durchführung und organisatorische Rahmenbedingungen einteilt (siehe Anhang). Ergänzend dazu werden Fragen verwendet, die sich an den Trigger-Fragen des Value Proposition Designs [135] orientieren (siehe Anhang). Die nachfolgende Tabelle 17 zeigt die Kategorisierung der Fragen zur Erhebung der Benutzeranforderungen in Bezug auf die Erkenntnisse der Nutzungskontextanalyse.

Tabelle 17: Fragen zur Erhebung der Benutzeranforderungen.

Quelle: eigene Darstellung.

Kategorie	Bezug zur Erkenntnis	Nr.	Fragen
Einleitung	E3	1	Welche Aufgaben sollten durch eine Software unterstützt werden?
	E2	2	Welche Qualifikation ist nötig, um in der Montagelinie zu arbeiten?
Voraussetzung	E2	3	Wie viele Jahre haben sie Erfahrung mit Montagetätigkeiten?
	E4	4	Wie gefallen ihnen die unterstützenden Hilfsmittel? (Monitor, SAB)
	E4	5	Wünschen Sie sich zusätzliche Hilfsmittel?
	E3	6	Wie lange nutzen sie die vorhandenen Hilfsmittel?
Durchführung	E3	7	Wie lange dauert ein Montagetraining?
	E3	8	Welche Unterbrechungen/Störungen gibt es und warum?
Organisatorische Rahmenbedingungen	E2	9	Was gefällt ihnen an dem Montagetraining?
	E2	10	Was gefällt ihnen nicht an dem Montagetraining?
	E2	11	Welche Stressfaktoren gibt es während des Montagetrainings?

5.1.5 Ergebnisse der Anforderungsanalyse

Die Erhebung der Benutzeranforderungen erfolgte im Rahmen von teilstrukturierten Einzelinterviews mit Hilfe des erstellten Fragebogens. Die Verbalisierungen der Probanden wurden dabei mit einem Diktiergerät aufgenommen, anschließend transkribiert und die wesentlichen Aussagen für jede Frage konsolidiert. Die nachfolgende Tabelle 18 gibt Aufschluss über die Zusammenfassung der Nutzeraussagen in Bezug auf die gestellten Fragen des Fragebogens.

Tabelle 18: Zusammenfassung der Nutzeraussagen.

Quelle: eigene Darstellung.

Bezug zur Frage	Nr.	Zusammenfassung der Nutzeraussagen
Frage 1	1	Die Entnahme der notwendigen Teile sollte unterstützt werden.
	2	Die Montage der Bauteile in korrekter Reihenfolge sollte unterstützt werden.
Frage 2	3	Alle Montagearbeiter haben einen technischen Bildungshintergrund.
Frage 3	4	Die Montageerfahrung der befragten Personen schwankt zwischen einem und 30 Jahren.
Frage 4	5	Die Monitoranzeige ist simpel, da nur die Teilebezeichnungen angezeigt werden.
	6	Die Bezeichnungen sind schwer einzuprägen und sollten vereinfacht werden.
	7	Das SAB ist nicht detailliert genug und für einen Trainee schwer zu verstehen.
	8	Das SAB ist für eine erfahrene Person hilfreich, um die Montageschritte und deren Reihenfolge nachzuschlagen (z.B. nach längerem Urlaub oder Krankheit).
Frage 5	9	Ein Hilfsmittel zur Bauteilentnahme und Bauteilpositionierung wird erwünscht.
Frage 6	10	Hilfsmittel werden hauptsächlich für die Zeit des Anlernens verwendet.
Frage 7	11	Die Anlernzeit ist individuell und schwankt zwischen 2-7 Tagen.
	12	Die Dauer des Anlernens ist abhängig von der Motivation des Trainees. Je motivierter eine Person ist, desto schneller und besser ist der Anlernprozess.
Frage 8	13	Das Training kann an manchen Tagen aufgrund von krankheitsbedingten Ausfällen nicht stattfinden. Demnach steht an diesen Tagen kein Trainer zur Verfügung.
	14	Der Trainee hält die Taktzeit beim Anlernen nicht ein. Dadurch kommt es zu Störungen im Produktionsablauf. (Es bildet sich ein Stau)
Frage 9	15	Die Zusammenarbeit mit einem Trainer wird sehr geschätzt.
	16	Der Trainer steht bei Fragen zur Verfügung.

Frage 10	17	Es besteht eine mangelnde didaktische Kompetenz einzelner Personen.
	18	Die Kommunikation zwischen dem Trainer und dem Trainee ist oft schwierig, da sprachliche Unterschiede vorhanden sind.
	19	Die Trainees scheuen sich davor, mehrfach beim Trainer nachzufragen, auch wenn sie etwas nicht verstanden haben.
Frage 11	20	Das Anlernen in der Linie ist aufgrund der Taktzeit sehr stressig.

Auf Basis der Aussagen lassen sich funktionale (FA) und nicht-funktionale Anforderungen (NFA) an die Gestaltung einer HMD-basierten Trainingsanwendung ableiten. Die nachfolgende Tabelle 19 fasst diese zusammen.

Tabelle 19: Funktionale und nicht-funktionale Gestaltungsanforderungen.

Quelle: eigene Darstellung.

Einteilung	Bezug zur Nutzeraussage	Anforderung	Beschreibung
Funktionale Anforderungen (FA) an die Gestaltung einer HMD-basierten Trainingsanwendung	Aussage 1, 2, 9	Unterstützung	Die HMD-basierte Trainingsanwendung sollte einen Benutzer bei der Entnahme der benötigten Teile und Werkzeuge sowie bei deren Positionierung und Ausrichtung unterstützen.
	Aussage 3, 4, 18	Individualisierbarkeit	Die HMD-basierte Trainingsanwendung sollte von Personen mit einem technischen Bildungshintergrund, unterschiedlichen Montageerfahrungen und verschiedenen Sprachkenntnissen nutzbar sein.
	Aussage 5-8	Verständlichkeit	Die bereitgestellten Informationen müssen so einfach und verständlich sein, dass sie sowohl von Anfängern als auch von Experten genutzt werden können. Demnach müssen für Trainees zu Beginn des Trainings viele Informationen bereitgestellt werden. Mit zunehmender Erfahrung können die Informationen reduziert werden.
	Aussage 12	Motivation	Die HMD-basierte Trainingsanwendung sollte so gestaltet sein, dass sie einen Benutzer motiviert, das Training erfolgreich abzuschließen.
	Aussage 13	Bedienbarkeit	Die HMD-basierte Trainingsanwendung sollte selbsterklärend gestaltet und von einer Person allein bedienbar sein.
	Aussage 17	Didaktik	Die HMD-basierte Trainingsanwendung sollte den Benutzer unterstützen, die Montage eines bestimmten Motors zu erlernen. Dabei müssen didaktische Prinzipien berücksichtigt werden.
	Aussage 10, 11, 19	Zugänglichkeit	Die HMD-basierte Trainingsanwendung sollte jedem Trainee für die Zeit des Trainings zur Verfügung stehen. Sie kann individuell und beliebig oft genutzt werden.
Nicht-Funktionale (NFA) an die Gestaltung einer HMD-basierten Trainingsanwendung	Aussage 15, 16	Hilfe	Die HMD-basierte Trainingsanwendung sollte den Trainer nicht vollständig substituieren. Der Trainer sollte dem Benutzer bei potentiellen Fragen zur Verfügung stehen.
	Aussage 14, 20	Trainingsinsel	Das Training sollte außerhalb der Produktionslinie stattfinden, um den Produktionsfluss nicht zu stören und um den Stress der Trainees, welcher durch die Taktzeit entsteht, zu reduzieren.

5.1.6 Ergebnisse der Aufgabenanalyse

Als beispielhafte Arbeitsaufgabe für die Aufgabenanalyse dient die Montage des BMW Reihensechszylinder- Benzinmotors (B58). Diese Tätigkeit erfolgt am ersten AP (Takt 1) in der zuvor beschriebenen Montagelinie. Die Montagesequenz besteht aus 15 Hauptaufgaben und 65 Teilaufgaben. Die Hauptaufgaben gehen aus der Analyse des SABs hervor. Die Beschreibung der Arbeitsaufgaben in dem Dokument ist allerdings unzureichend, da viele Abkürzungen (z.B. ZK-Kapsel) verwendet werden und auf die Angabe von einzelnen Teilschritten verzichtet wird. Demnach muss die Dokumentenanalyse durch Beobachtungen und einer aktiven Teilnahme des Produktverantwortlichen am Montageprozess ergänzt werden, um ein umfassendes Verständnis für die zu erlernende Montagetätigkeit zu erlangen. Dadurch können detaillierte Informationen zu den Teilaufgaben der einzelnen Montageschritte gesammelt werden. Hierzu zählen die Anzahl der Bauteile und Schrauben, die benötigten Werkzeuge sowie deren Montagepositionen am Motor. Diese Informationen müssen in die Gestaltung des Trainingssystems einfließen. Durch die Aussagen der Nutzer (vgl. Tabelle 18) und den daraus abgeleiteten Gestaltungsanforderungen (vgl. Tabelle 19) geht hervor, dass die Bauteilentnahme und Bauteilpositionierung am Motor durch die HMD-basierte Trainingsanwendung unterstützt werden sollen. Die nachfolgende Abbildung 23 fasst die gesammelten Erkenntnisse am Beispiel der ersten drei Hauptaufgaben der Motormontage des B58 (Takt 1) in einem hierarchischen Strukturbaum zusammen. Auf eine Darstellung aller 15 Haupt- und 65 Teilaufgaben wird an dieser Stelle verzichtet.

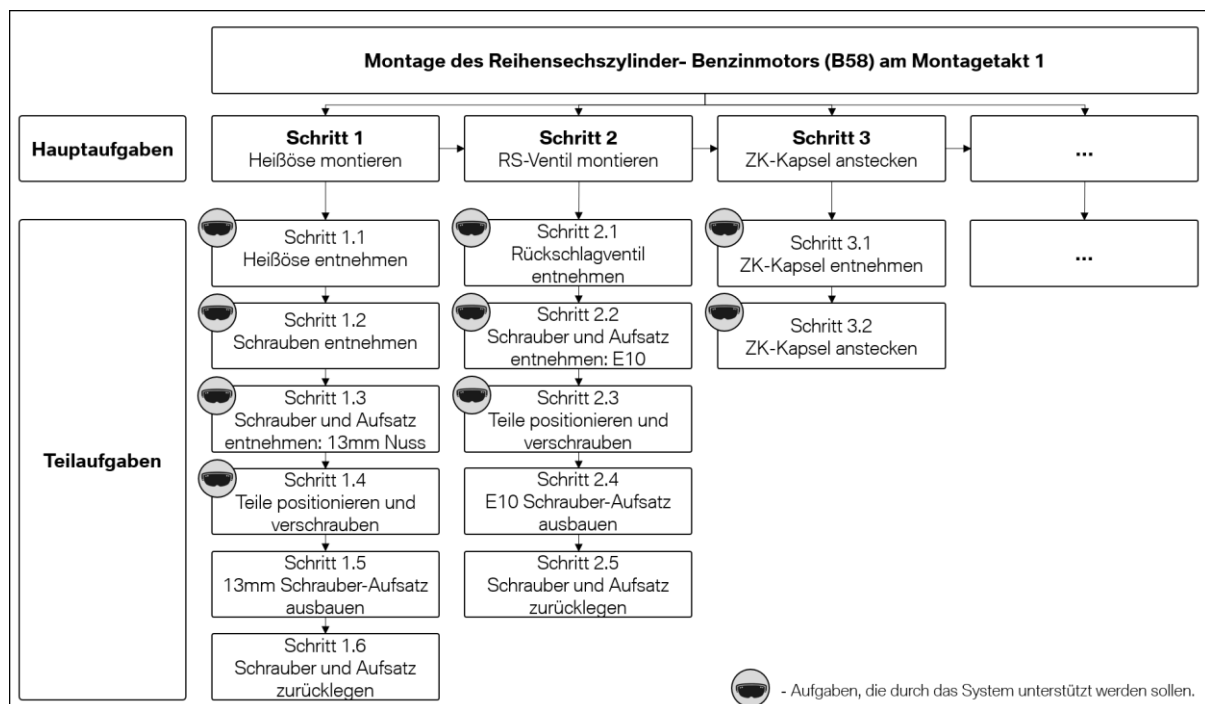


Abbildung 23: Zusammenfassende Erkenntnisse der Aufgabenanalyse.

Quelle: eigene Darstellung.

5.1.7 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Nutzungskontextanalyse geben Aufschluss über die ausgewählte Motormontagelinie der BMW Group am Produktionsstandort München. Durch die Dokumentenanalyse konnte zunächst ein

grobes Verständnis für die Aufgaben der Personen erlangt werden. Allerdings reichen diese Informationen nicht aus, um den Nutzungskontext ausreichend detailliert zu beschreiben. Daher wurden ergänzende Methoden verwendet. Neben einer direkten Beobachtung im Feld, hat sich der Produktverantwortliche in der Montagelinie an einem ausgewählten AP anlernen lassen. Durch die Anwendung dieser Methodentriangulation konnten umfassende Informationen zur Umgebung und zu den Personen gesammelt werden. Es bedarf keiner Anpassung der ersten Phase der Analysemethodik (vgl. Abbildung 16), da sich diese als nützlich erwiesen hat.

Auf Basis der Erkenntnisse aus der Nutzungskontextanalyse wurde ein teilstrukturierter Fragebogen erstellt und 10 Personen, welche in der ausgewählten Montagelinie arbeiten, wurden befragt. Einige von ihnen äußerten sich anfänglich skeptisch bezüglich der Aufnahme durch ein Diktiergerät. Nachdem ausführlich erläutert wurde, dass die Aufnahmen streng vertraulich und anonymisiert behandelt werden, stimmten alle Teilnehmer der Aufnahme zu. Dennoch äußerte eine Person folgendes, nachdem das Diktiergerät abgeschaltet wurde: „Jetzt ist das Gerät endlich aus, jetzt kann [ich] sagen, was ich wirklich denke“. Aus dieser Aussage lässt sich schlussfolgern, dass Personen möglicherweise gehemmt sind, ihre Gedanken und Meinungen vollständig zu verbalisieren, wenn ein Diktiergerät zur Aufnahme verwendet wird. Demnach sollten bei zukünftigen Interviews eventuell zwei Personen die Befragung durchführen. Eine Person, welche die Versuchsteilnehmer befragt und eine weitere Person, die alle wichtigen Informationen schriftlich dokumentiert. Dennoch lieferten die Aussagen der befragten Personen (vgl. Tabelle 18) wichtige Informationen über deren Tätigkeit mit ihren Stärken und Schwächen. Die daraus abgeleiteten sechs funktionalen und drei nicht-funktionalen Anforderungen müssen bei der Gestaltung der HMD-basierten Trainingsanwendung berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Aufgabenanalyse geben einen abschließenden und umfassenden Überblick über die Hauptaufgaben und Teilaufgaben der Personen am Beispiel einer ausgewählten Montagesequenz. Durch die erhobenen Anforderungen wird ersichtlich, welche Tätigkeiten durch die HMD-basierte Trainingssoftware unterstützt werden sollten. Die Darstellung in dem hierarchischen Strukturbaum ist übersichtlich und liefert eine hervorragende Grundlage für die Gestaltung der Software.

5.1.8 Zusammenfassung der Nutzungskontext- & Anforderungsanalyse

In diesem Abschnitt erfolgte die Überprüfung der Analysemethodik des erarbeiteten Vorgehensmodells (vgl. Abschnitt 4.2.5). Die Anwendung des Methodenmix lieferte umfassende Informationen zu einer Motormontagelinie der BMW Group am Standort München und den Personen, die dort tätig sind. Aus den resultierenden Erkenntnissen wurde ein Fragebogen zur Erhebung der Nutzeranforderungen abgeleitet und zehn Personen im Rahmen von teilstrukturierten Interviews befragt. Die Aussagen der Probanden gaben Aufschluss über deren Tätigkeit und zeigen mögliche Verbesserungspotentiale des aktuellen Anlernprozesses auf. Aus den analysierten Verbalisierungen wurden funktionale und nicht-funktionale Anforderungen abgeleitet. Diese müssen bei der Gestaltung der HMD-basierten Trainingsanwendung berücksichtigt und durch geeignete Evaluationen überprüft werden. Abschließend wurden die Erkenntnisse aus der Nutzungskontext- und der Anforderungsanalyse am Beispiel einer ausgewählten Montagetätigkeit in einem hierarchischen Strukturbaum zusammengefasst.

Die Montage des BMW Reihensechszylinder-Benzinmotors am ersten AP (Takt 1) der beschriebenen Montagelinie dient als exemplarischer Anwendungsfall für die vorliegende Dissertation. Aus der Aufgabenanalyse ging hervor, dass die Tätigkeit mit 15 Hauptaufgaben und 65 Teilaufgaben so komplex ist, dass sie ohne Hilfsmittel und ein intensives Training nicht ausführbar ist. Daher könnte der Einsatz eines AR-basierten Trainingssystems nützlich sein.

5.2 Gestaltung

In diesem Abschnitt erfolgt die Gestaltung des zweiten Artefakts dieser Dissertation (vgl. Abschnitt 2.2). Das ist ein AR-basiertes Assistenzsystem, was durch die Bereitstellung von relevanten Informationen darauf abzielt, Benutzer beim Erlernen manueller Montagetätigkeit effektiv, effizient und zufriedenstellend zu unterstützen. Es besteht aus einem Anzeigegerät (Hardware) und einer Trainingssoftware, die sich aus verschiedenen Komponenten (vgl. Abbildung 17) zusammensetzt. Als Anzeigegerät dient ein kabelloses AR-basiertes OST-HMD, die Microsoft HoloLens. Bei der Gestaltung der verschiedenen Softwarekomponenten werden die Erkenntnisse aus der zuvor durchgeführten Nutzungskontext- und Anforderungsanalyse sowie die verschiedenen Gestaltungshinweise des Vorgehensmodells berücksichtigt (vgl. Abbildung 19). Die Entwicklungsumgebung Unity3D, das Bildverarbeitungsprogramm Adobe Photoshop und die 3D-Grafiksoftware Blender werden für die Gestaltung der Trainingssoftware verwendet. Die nachfolgenden Abschnitte geben Auskunft über den Aufbau der Software, über die Gestaltung der Bedienoberfläche, der Gamification-Elemente, der Interaktionsmodalitäten, des Nutzerfeedbacks sowie des Inside-Out-Trackings.

5.2.1 Aufbau der Trainingssoftware

Anhand einer kurzen Beschreibung des Programmablaufplans (engl. Flowchart) wird in diesem Abschnitt der grobe Aufbau der Trainingssoftware dargelegt. Nachdem ein Benutzer die Trainingssoftware gestartet hat, gelangt er ins Hauptmenü. Dort hat er zunächst die Möglichkeit, eine Sprache zu wählen (deutsch oder englisch). Diese Auswahl wird für die entsprechenden audiovisuellen Inhalte innerhalb der gesamten Software übernommen. Zusätzlich zur Sprachauswahl hat der Benutzer die Möglichkeit, zwischen vier verschiedenen Level zu wählen (Einführung, Anfänger, Fortgeschritten, Experte). Diese unterscheiden sich in der Menge der bereitgestellten Informationen. In der Einführung erhält ein Benutzer viele wichtige Informationen, um das Montagetraining erfolgreich abzuschließen. Diese werden über die Level hinweg sukzessive reduziert. Im Experte-Level stehen einem Benutzer, im Vergleich zu den anderen Level, die wenigsten unterstützenden Informationen für die Tätigkeitsausführung zur Verfügung. Im Gegensatz zum Anfänger-, Fortgeschritten- und Experte-Level erhält ein Benutzer in der Einführung zusätzlich noch eine ausführliche Erläuterung zu den einzelnen Funktionalitäten der Software. Hierzu werden Sprachhinweise genutzt. Diese werden durch visuelle Signifiers ergänzt, die dem Benutzer mögliche Interaktionen anzeigen und ein gefahrloses Erproben der Software ermöglichen (vgl. Abschnitt 4.3.6). Innerhalb eines jeden Levels muss ein Benutzer die 15 Montageschritte der ausgewählten Montagetätigkeit absolvieren (vgl. Abbildung 23). Zwischen den einzelnen Schritten kann der Benutzer selbstständig wechseln. Nachdem

alle Montageschritte erfolgreich absolviert wurden, hat der Benutzer die Möglichkeit, das Training zu beenden oder zurück ins Hauptmenü zur Sprachauswahl zu gelangen. Die nachfolgende Abbildung 24 fasst den beschriebenen Programmablaufplan schematisch zusammen.

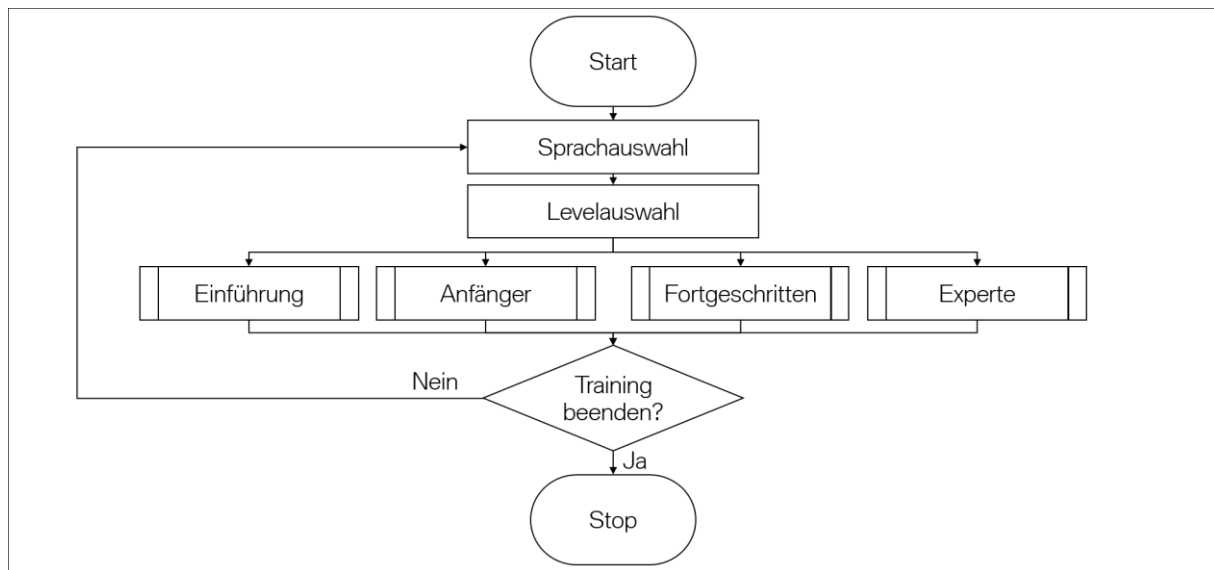


Abbildung 24: Programmablaufplan der Trainingssoftware.

Quelle: eigene Darstellung.

5.2.2 Gestaltung der Bedienoberfläche

Aus den funktionalen Nutzeranforderungen (vgl. Tabelle 19) und den Erkenntnissen aus der strukturierten Literaturrecherche geht hervor (vgl. Abbildung 14), dass die Trainingssoftware individualisiert werden soll. Das wird durch die Bereitstellung verschiedener Sprachen und Level berücksichtigt (vgl. Abschnitt 5.2.1). Zusätzlich dazu empfiehlt sich die Verwendung von multimodalen Informationen, um verschiedene Lern-typen anzusprechen. Diese sollten über eine Bedienoberfläche abrufbar sein und einfach, selbsterklärend sowie in sich geschlossen gestaltet werden (vgl. Abschnitt 4.3.6). Darüber hinaus müssen sie einen Benutzer bei der Entnahme der benötigten Teile und Werkzeuge sowie bei deren Positionierung und Ausrichtung unterstützen (vgl. Tabelle 11). Hierzu liefert die im Abschnitt 4.3.4 dargelegte Wissensbasis verschiedene Lösungsvorschläge. Diese wurden bei der Gestaltung der Bedienoberfläche berücksichtigt. Die nachfolgende Abbildung 25 zeigt die Bedienoberfläche der HMD-basierten Trainingssoftware, welche auf Basis der verschiedenen Erkenntnisse und Anforderungen aus der Literatur und der Praxis gestaltet wurde.

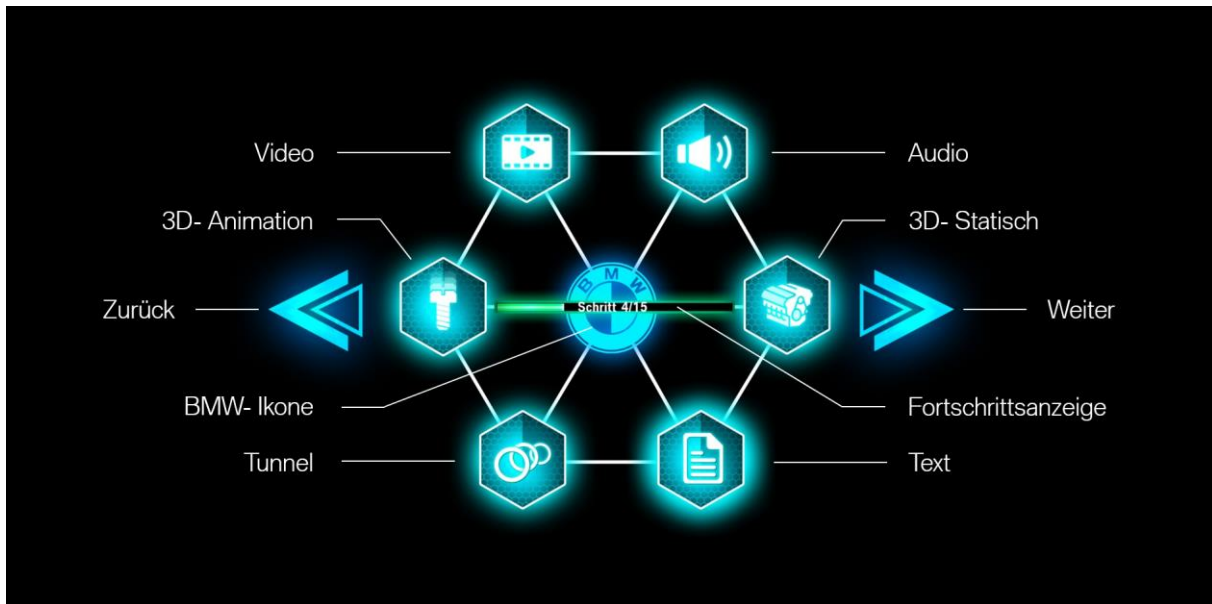


Abbildung 25: Bedienoberfläche der HMD-basierten Trainingssoftware.

Quelle: eigene Darstellung.

Die Bedienoberfläche besteht aus sechs Funktionselementen, welche in einem Sechseck angeordnet sind. Diese besitzen eine sechseckige Form, eine Wabenstruktur, eine blau-weiße Farbe und jeweils eine weiße Ikone, welche die Funktion des jeweiligen Elements verdeutlichen soll. Darüber hinaus werden dem Benutzer zwei Schaltflächen in Form von blauen Pfeilen zur Verfügung gestellt, um zwischen den einzelnen Montageschritten beliebig hin und her zu wechseln. Zusätzlich dazu befinden sich im Zentrum der Bedienoberfläche eine Fortschrittsanzeige und die Ikone des Automobilherstellers BMW.

Über die Funktionselemente der Bedienoberfläche werden einem Benutzer verschiedene Informationen für einen Montageschritt eines Montageprozesses zur Verfügung gestellt. Diese können bei Bedarf (engl. on-demand) mittels diverser Interaktionsmodalitäten aktiviert bzw. deaktiviert werden. Über die **Audio**-Schaltfläche erhält ein Benutzer Sprachanweisungen zum jeweiligen Montageschritt in deutscher oder englischer Sprache. Die Funktionalität **3D-Statisch** überlagert das zu montierende virtuelle Bauteil am Referenzobjekt in der Realität. Bezogen auf den durch die Nutzungskontext- und Anforderungsanalyse ausgewählten Montageprozess (vgl. Abbildung 23) bedeutet das, dass virtuelle Bauteile an der korrekten Position des B58-Motors statisch visualisiert werden. Um eine korrekte räumliche Wahrnehmung zu gewährleisten, werden das Kurbelgehäuse und der Zylinderkopf des B58-Motors als Verdeckungsgeometrien ausgeführt (vgl. Abschnitt 4.3.4). Dadurch wird ein Benutzer bei der Montage unterstützt, da relevante Bauteile am unmittelbaren Ort (in-situ) und in korrekter räumlicher Lage visualisiert werden. Neben der Darstellung von räumlichen augmentierten Informationen können auch 2D-Inhalte einen Benutzer beim Erlernen manueller Montagetätigkeiten unterstützen. Hierfür bieten Textinformationen eine gute Möglichkeit. Aktiviert der Benutzer die Schaltfläche **Text**, so öffnet sich ein virtuelles Dialogfenster und der Nutzer erhält Informationen zur Tätigkeit (z.B. schrauben, stecken), zu den benötigten Bauteilen, Materialien und Werkzeugen. Diese Informationen sind notwendig, um den Benutzer bei seiner Tätigkeitsausführung zu unterstützen und der funktionalen Anforderung der Anwendungsdomäne (vgl. Tabelle 19) gerecht zu werden. Eine weitere Funktionalität ist der **Tunnel** (vgl. Abschnitt 4.3.4). Durch die virtuelle Bézierkurve wird ein Benutzer unterstützt, die für einen Montageschritt benötigten Bauteile und Werkzeuge aus den dafür

vorgesehenen Behältern und Boxen zu entnehmen. Darüber hinaus wird durch den Tunnel das Auffinden von Objekten erleichtert, die außerhalb des Sichtfelds des Benutzers liegen (vgl. Tabelle 14). Im Gegensatz zu der zuvor beschriebenen 3D-Statischen Anzeige, nutzt die Funktionalität **3D-Animation** ein Drahtgittermodell (vgl. Abschnitt 4.3.4) und eine Animation, um dem Benutzer zum einen die korrekte Montageposition anzuzeigen und zum anderen den Montagevorgang zu verdeutlichen. Dies könnte eine hilfreiche Unterstützung bei komplexen Vorgängen, wie dem Verlegen von Kabeln (Montageschritt sieben der B58-Motormontage Takt 1), sein. Zusätzlich zu den bereits genannten Funktionalitäten bekommt ein Benutzer die Möglichkeit, ein **Video** anzusehen. Darin wird ersichtlich, wie ein Experte (Trainer) den jeweiligen Montageschritt ausführt und welche Bauteile, zusätzliche Materialien und Werkzeuge verwendet werden. Diese Funktionalität ist eine Forderung, welche aus der strukturierten Literaturrecherche hervorgegangen ist (vgl. Abbildung 14). Demnach unterstützt ein Video das passive Lernen, wodurch die prozeduralen Fähigkeiten eines Benutzers gestärkt werden. Dadurch wird der Trainingseffekt erhöht. Neben den genannten sechs Funktionalitäten hat ein Benutzer die Möglichkeit, die **BMW-Ikone** im Zentrum der Bedienoberfläche zu aktivieren. Somit erhält er einen Überblick über den gesamten Montageprozess. Durch farbliche Unterscheidungen (grün, gelb, blau) wird ersichtlich, in welchem Montageschritt sich der Benutzer gerade befindet, welche erledigt wurden und welche noch vor ihm liegen. Die Bereitstellung solcher Strukturinformationen ist essentiell für den Aufbau eines mentalen Modells.

Die Bedienoberfläche bleibt innerhalb der gesamten Trainingssoftware unverändert. Lediglich die Menge der bereitgestellten Informationen wird von Level zu Level reduziert. Mit dem Ziel den Erwerb der prozeduralen Fähigkeiten eines Benutzers zu steigern (vgl. Abbildung 14), werden die Funktionalitäten, welche den Benutzer am stärksten anleiten, sukzessive reduziert. Im ersten Level, der Einführung, stehen einem Benutzer alle zuvor beschriebenen Informationen zur Verfügung. Im Anfänger-Level erhalten der Tunnel und die 3D-Animation eine Restriktion. Zusätzlich dazu werden das Video und die statische 3D-Anzeige im Fortgeschritten-Level gesperrt. Im Experte-Level weisen alle Funktionalitäten eine Restriktion auf. Lediglich eine initiale Audioanweisung zu Beginn jedes Montageschritts unterstützt den Benutzer bei der Ausführung seiner Tätigkeit (z.B. „Schritt 1, bitte montieren sie die Heißöse“). Visuell werden die Restriktionen durch ein gelbes Blitzsymbol an der jeweiligen Funktionalität der Bedienoberfläche verdeutlicht. Die nachfolgende Abbildung 26 zeigt die Bedienoberflächen der jeweiligen Level mit den zuvor beschriebenen Einschränkungen der entsprechenden Funktionalitäten.

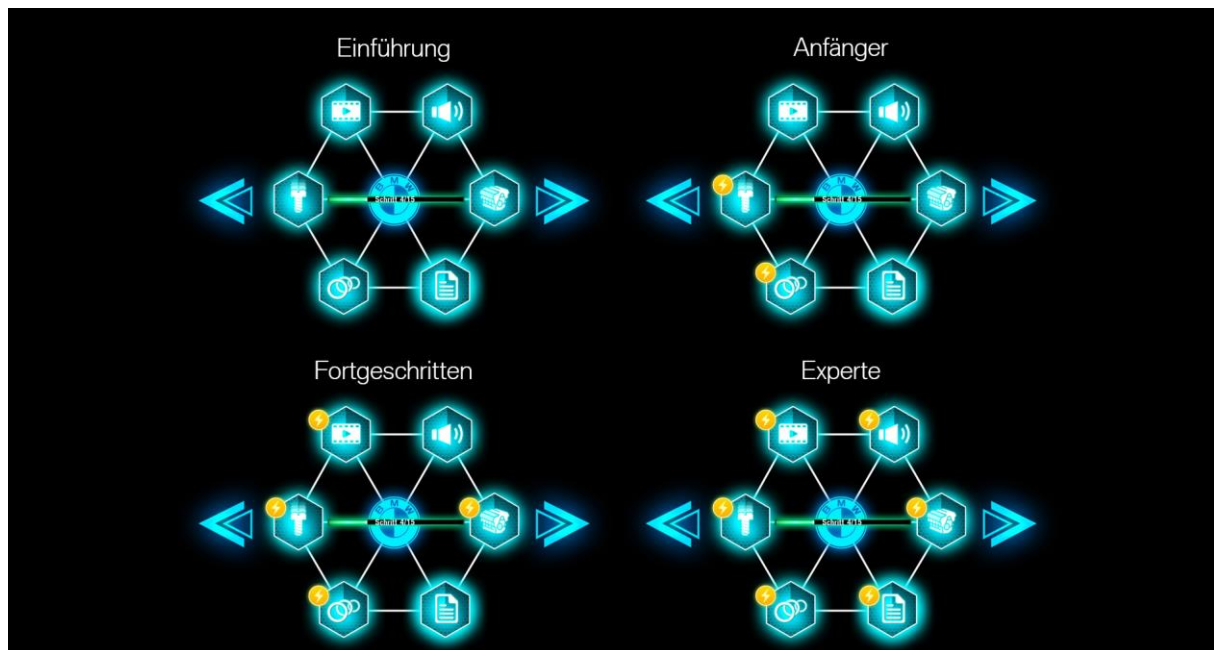


Abbildung 26: Bedienoberfläche der verschiedenen Level der Trainingssoftware.

Quelle: eigene Darstellung.

Neben den bereits genannten Hinweisen, Erkenntnissen und Anforderungen aus der Literatur und der Praxis wurden weitere Empfehlungen bei der Gestaltung der Bedienoberfläche berücksichtigt (vgl. Tabelle 14). Demnach fordert die Literatur eine Reduzierung der augmentierten virtuellen Inhalte auf ein Minimum, um die visuelle Ablenkung und Belastung des Benutzers zu senken. Darüber hinaus sollen Informationen so angeordnet werden, dass ein Benutzer aus verschiedenen Blickwinkeln mit diesen interagieren kann und deren Positionierung im realen Raum Sinn ergeben. Diese Empfehlungen wurden bei der Gestaltung der HMD-basierten Bedienoberfläche wie folgt interpretiert:

- Die Reduzierung der virtuellen Inhalte wird durch On-Demand-Funktionalitäten erreicht. Lediglich die zuvor beschriebene Bedienoberfläche ist permanent für einen Benutzer sichtbar. Die verschiedenen Informationen, welche durch die Bedienoberfläche bereitgestellt werden, lassen sich auf Anforderung des Benutzers (engl. on-demand) durch entsprechende Interaktionen beliebig aktivieren bzw. deaktivieren.
- Die Bedienoberfläche wird am Ort des Geschehens positioniert und fest im realen Raum verankert, sodass sie sich stets über dem Motor befindet und den Benutzer bei seiner Tätigkeitsausführung nicht behindert.
- Um zu gewährleisten, dass ein Benutzer von jeder Position im realen Raum mit der virtuellen Bedienoberfläche interagieren kann, wird diese mit einer speziellen Funktionalität ausgestattet. Sie nennt sich Billboarding und sorgt dafür, dass die Bedienoberfläche stets orthogonal zur Blickrichtung des Benutzers ausgerichtet ist. Dadurch schaut ein Benutzer zu jeder Zeit frontal auf die Bedienoberfläche und kann mit den Funktionalitäten interagieren.

5.2.3 Gestaltung der Gamification-Elemente

Mit dem Ziel die Motivation und das Engagement der Benutzer während des Montagetrainings zu steigern (vgl. Tabelle 19), werden die im Abschnitt 4.3.5 dargelegten Empfehlungen aus der Literatur bei der Gestaltung der Gamification-Elemente berücksichtigt. Demnach empfehlen sich Struktur- und Fortschrittsinformationen für die Einbindung eines Benutzers in den Montageprozess, da sie eine klare Richtung vorgeben. Verschiedene Schwierigkeitsstufen müssen berücksichtigt werden, um eine reine Schritt-für-Schritt Anleitung zu vermeiden und die Verwendung der Trainingssoftware sowohl für Anfänger als auch für Experten sicherzustellen. Darüber hinaus sollen Benutzer ein Feedback erhalten und für eine erfolgreiche Tätigkeit belohnt werden. Diese Empfehlungen werden wie nachfolgend beschrieben und bei der Gestaltung der Gamification-Elemente berücksichtigt.

Durch die Bereitstellung eines Fortschrittsbalkens im Zentrum der Bedienoberfläche (vgl. Abbildung 25) und des Prozessüberblicks (vgl. Abschnitt 5.2.2), der auf Abruf aktiviert werden kann, wird eine klare Struktur des Montageprozesses vorgegeben. Zusätzlich erinnern die Farbgebung und das Design der Bedienoberfläche an ein Spiel und sorgen für die notwendige Einbindung des Benutzers in den Montageprozess. Über die zuvor beschriebenen Level werden die verschiedenen Schwierigkeitsstufen berücksichtigt. Je nach Fähigkeit und Erfahrung des Benutzers kann dieser zwischen vier verschiedenen Level mit unterschiedlichen Schwierigkeitsstufen wählen (vgl. Abbildung 26). Dementsprechend erhält ein Anfänger viele und ein Experte wenige Informationen als Unterstützung zur Bewältigung der Montage. Um einen Benutzer zu motivieren, das Montagetraining mit den zur Verfügung stehenden Informationen erfolgreich zu absolvieren, wurde ein virtueller animierter 3D-Charakter (Embly) geschaffen. Dieser ist direkt neben der Bedienoberfläche angeordnet und einfach gestaltet. Darüber hinaus wurde eine weitere Anforderung aus der Literatur berücksichtigt [176] und auf eine direkte Benutzerinteraktion mit Embly verzichtet, um den Fokus des Benutzers auf die Bewältigung der Arbeitsaufgabe zu legen. Sollte der Benutzer eine der gesperrten Funktionalitäten der Bedienoberfläche für die Absolvierung der Montagetätigkeit benötigen, so kann diese aktiviert werden und die entsprechenden Informationen werden bereitgestellt. Allerdings erhält der Benutzer dadurch ein negatives multimodales Feedback, welches wie folgt umgesetzt wird:

- Sobald der Benutzer ein restriktives Funktionselement der Bedienoberfläche aktiviert, verfärbt sich dieses und ein akustisches Signal wird über die Lautsprecher des HMDs ausgegeben.
- Ergänzend dazu verliert Embly seine Lebensenergie. Diese wird durch einen grünen Statusbalken über dem 3D-Charakter dargestellt. Eine zusätzliche Animation des Charakters verstärkt das Feedback. Die Lebensenergie ist aufgebraucht, sobald der Benutzer ein restriktives Funktionselement siebenmal aktiviert hat. Dann gelangt er automatisch zurück in das Hauptmenü zur Sprachauswahl und muss erneut beginnen (vgl. Abbildung 24).

Dieses multimodale Feedback aus optischen und akustischen Signalen soll einen Benutzer motivieren, das Montagetraining mit den verfügbaren unterstützenden Informationen zu absolvieren. Zusätzlich unterstützt die Einschränkung der Informationen mit einer starken Anleitung (z.B. der Tunnel) den Erwerb

der prozeduralen Fähigkeiten einer Person. Die nachfolgende Abbildung 27 zeigt das beschriebene Gamification-Konzept am Beispiel einer aktivierten, restriktiven Funktionalität der Bedienoberfläche des Anfänger-Levels. Darüber hinaus ist der virtuelle 3D-Charakter in verschiedenen Ansichten dargestellt.

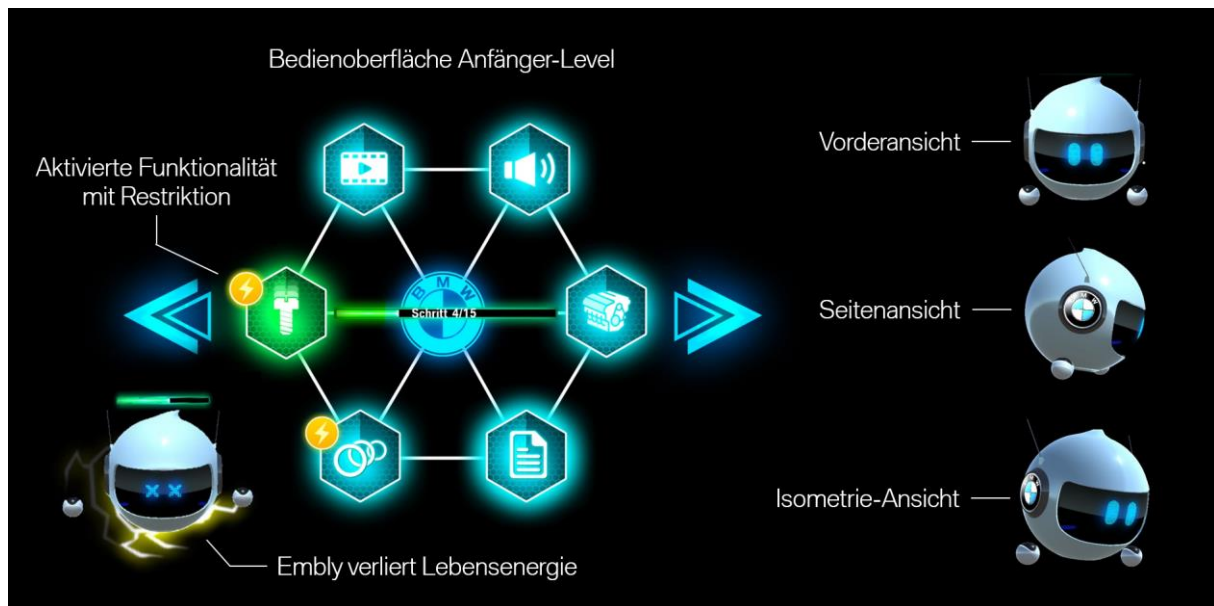


Abbildung 27: Gamification-Konzept der HMD-basierten Trainingsanwendung.

Quelle: eigene Darstellung.

Im Gegensatz dazu erhält ein Benutzer ein positives Feedback, sobald er einen Montageschritt und die gesamte Prozedur erfolgreich abgeschlossen hat. Dieses Feedback erfolgt audiovisuell in Form einer Animation des 3D-Charakters und einer kurzen Sprachausgabe über die Lautsprecher des HMDs („gut gemacht“).

Zusätzlich zu dem beschriebenen Konzept wurde ein weiteres didaktisches Element in die Trainingssoftware integriert. Es nennt sich Fading und zielt durch das systematische Ausblenden von einzelnen Lösungsschritten einer prozeduralen Tätigkeit darauf ab, die prozeduralen Fähigkeiten einer Person zu stärken [99]. Renkl et al. [215] unterscheiden zwischen backward- (von hinten beginnend) und frontward (von vorne beginnend) Fading. In ihrem Beitrag legen sie dar, dass backward Fading einen größeren positiven Einfluss auf den Fähigkeitserwerb einer Person hat als frontward Fading. Demnach wird der backward Fading-Ansatz bei der Gestaltung der Software berücksichtigt.

Die Bereitstellung der multimodalen Informationen wird über die einzelnen Level hinweg systematisch reduziert. Dementsprechend erhält der Benutzer in der Einführung zunächst keine Informationen zum 15. Montageschritt, im Anfänger-Level keine Informationen zum 14. und 15. Montageschritt, im Fortgeschritten-Level keine Informationen zum 13., 14. und 15. Montageschritt und im Experten-Level keine Informationen zum 12., 13., 14. und 15. Montageschritt. Diese werden dem Benutzer erst zur Verfügung gestellt, sobald dieser eine Quiz-Frage bezüglich des Montageschritts beantwortet hat. Die Frage wird dem Benutzer, wie in der nachfolgenden Abbildung 28 am Beispiel des 15. Montageschritts dargestellt, im Sichtfeld präsentiert.



Abbildung 28: Quizfrage während des Montagetrainings.

Quelle: eigene Darstellung.

Dem Benutzer stehen zur Beantwortung der Frage vier mögliche virtuelle 3D-Objekte zur Verfügung, welche nebeneinander angeordnet sind. Sie sind bläulich dargestellt und befinden sich in einer virtuellen transparenten Kugel, die animiert ist und kontinuierlich rotiert. Durch Interaktion des Benutzers mit dem entsprechenden virtuellen Objekt erfolgen die Auswahl und damit die Beantwortung der Frage. Sofern diese korrekt ist, verfärbt sich das virtuelle Bauteil grün und ein Signalton wird über die Lautsprecher des HMDs ausgegeben. Im Gegensatz dazu verfärben sich die Bauteile bei einer falschen Antwort rot. Nachdem die Frage korrekt beantwortet wurde, wird die Bedienoberfläche aktiv und dem Benutzer stehen alle multimodalen Informationen zur Absolvierung des Montageschritts zu Verfügung.

5.2.4 Gestaltung der Interaktionsmodalitäten

In diesem Abschnitt wird die Gestaltung der Interaktionsmodalitäten Gaze, Sprache und Gesten beschrieben (vgl. Abbildung 17). Wie im Abschnitt 4.3.6 dargelegt, sollten diese einfach und innerhalb der gesamten Trainingssoftware konsistent sein. Als Gaze-Cursor dient eine weiße 3D-Kugel. Diese befindet sich im Abstand von zwei Metern vor den Augen des Benutzers und kann über dessen Kopfbewegung gesteuert werden. Sobald der Benutzer den Gaze-Cursor über eine Funktionalität der Bedienoberfläche bewegt, verändert sich zum einen die Form des Cursors und zum anderen die Farbe der Funktionalität. Diese visuelle Veränderung wird auch als Hover-Effekt bezeichnet und signalisiert dem Benutzer, dass die Funktionalität aktiviert werden kann. Die Aktivierung erfolgt durch entsprechende Interaktion des Benutzers. Diese kann mittels der Gesteninteraktion „AirTap“ erfolgen, welche bereits durch das SDK¹³ der Microsoft HoloLens vorgegeben wird. Demnach streckt der Benutzer seinen Arm aus, sodass seine Hand im Sichtbereich der TOF-Kamera ist. Diese erkennt die Interaktion des Benutzers, welche durch ein schnelles zusammenführen des Zeigefingers und des Daumens ausgelöst wird. Neben der Interaktion über Gesten können auch Sprachbefehle genutzt werden, um mit den Funktionselementen der Trainingssoftware zu interagieren. Diese sollten sich auf einige wenige beschränken, um die Einfachheit der Software zu gewährleisten. Da das SDK der Microsoft HoloLens derzeit nur englischsprachige Befehle zulässt, beschränken sich diese innerhalb der gesamten Trainingssoftware auf die nachfolgend beschriebenen:

¹³ Die notwendigen Programmierwerkzeuge und Programmbibliotheken zur Entwicklung von HoloLens-basierten Anwendungen sind frei verfügbar und über folgende Internetseite abrufbar: <https://docs.microsoft.com/de-de/windows/mixed-reality/academy>.

- Der Sprachbefehl **Select** kann verwendet werden, sobald sich der Gaze-Cursor auf einem virtuellen Objekt befindet, sich seine Form von einer Kugel zu einer Hand und sich die Farbe des Funktionselements verändert. Mit diesem Sprachbefehl lassen sich die entsprechenden Funktionselemente aktivieren bzw. deaktivieren.
- Die Sprachbefehle **Next** und **Back** können genutzt werden, um zwischen einzelnen Montageschritten hin und her zu wechseln. Der Benutzer kann die beiden Sprachbefehle unabhängig von der Position des Gaze-Cursors zu jederzeit verwenden.
- Der Sprachbefehl **Menu** dient dem Benutzer bei möglichen Problemen mit der Software, in das Hauptmenü zurückzugelangen (vgl. Abbildung 24).

Die nachfolgende Abbildung 29 fasst die beschriebenen Interaktionsmodalitäten zusammen und verdeutlicht den beschriebenen Hover-Effekt am Beispiel der Text-Funktionalität. Darüber hinaus wird der Vergleich zwischen einer nicht-aktiven Funktionalität und einer Funktionalität, die durch den Sprachbefehl „Select“ oder der Gesteninteraktion „AirTap“ aktiviert wurde, sichtbar.

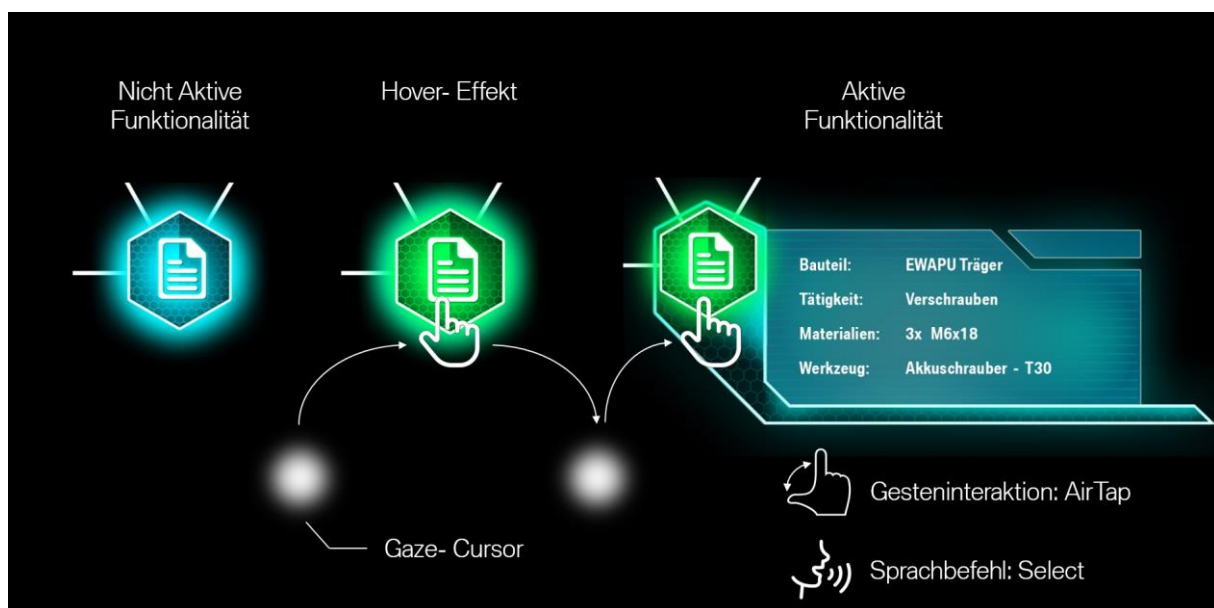


Abbildung 29: Interaktionskonzept der HMD-basierten Trainingsanwendung.

Quelle: eigene Darstellung.

5.2.5 Gestaltung des Nutzerfeedbacks

Neben dem zuvor beschriebenen audiovisuellen Feedback, welches ein Benutzer erhält sobald er mit den Funktionalitäten der Bedienoberfläche interagiert, werden in diesem Abschnitt zwei weitere Feedbackmodalitäten beschrieben. Für die Gestaltung der ersten Modalität wird eine Empfehlung aus der Literatur berücksichtigt (vgl. Abbildung 14). Demnach lassen sich bestimmte Hinweise (z.B. Fehler-Feedback) durch eine taktile Stimulation der Haut eines Benutzers vermitteln. Hierzu werden typischerweise Vibrationsarmbänder verwendet. Im Rahmen der Gestaltung des AR-basierten Trainingssystems wird ein **Myo-Armband** genutzt. Es besitzt eine Bluetooth-Schnittstelle, wodurch der Datenaustausch zwischen dem

Armband und der Microsoft HoloLens realisiert werden kann. Die dafür notwendigen Programmbibliotheken werden durch ein SDK bereitgestellt, welches speziell auf die Entwicklung von HoloLens-basierten Anwendungen ausgelegt ist¹⁴. Das Armband kann als Eingabe- und als Ausgabegerät genutzt werden. Die Eingabe erfolgt mittels Elektromyografie (EMG). Dabei wird die Muskelkontraktion am Unterarm eines Benutzers, welche durch fünf verschiedene Handgesten ausgelöst wird, über acht kreisförmig angeordnete EMG-Sensoren gemessen [216]. Zusätzlich dazu besitzt das Myo-Armband eine IMU (vgl. Abschnitt 4.3.1). Über die Bluetooth-Verbindung können die Daten der verschiedenen Sensoren an die HoloLens weitergegeben werden und ermöglichen einem Benutzer die Interaktion mit virtuellen Objekten. Neben den beschriebenen Eingabemodalitäten, welche im Rahmen dieser Dissertation nicht näher untersucht werden, ermöglicht das Armband eine vibrotaktile Stimulation am Unterarm eines Benutzers [217]. Diese dient als Feedback und wird innerhalb der Trainingssoftware wie folgt umgesetzt:

- Als Ergänzung zu dem audiovisuellen Feedback durch die Gamification-Elemente wird eine Vibration über das Armband ausgegeben, sobald der Benutzer ein restriktives Funktionselement auswählt (vgl. Abbildung 27) oder eine Frage falsch beantwortet (vgl. Abbildung 28). Diese Information wird von der Trainingssoftware über die Bluetooth Schnittstelle an das Armband weitergegeben und bewirkt eine Vibration des Armbands.

Mit der Gestaltung der zweiten Feedbackmodalität wird eine funktionale Anforderung der Anwendungsdomäne (vgl. Tabelle 19) adressiert. Demnach soll die Trainingssoftware einen Benutzer bei der Entnahme relevanter Bauteile und Werkzeuge unterstützen. Dies wird wie bereits im Abschnitt 5.2.2 dargelegt durch eine Tunnel-Visualisierung realisiert. Die nachfolgende Abbildung 30 zeigt den Tunnel und die Bedienoberfläche der Trainingssoftware mit der entsprechenden aktivierten Funktionalität.

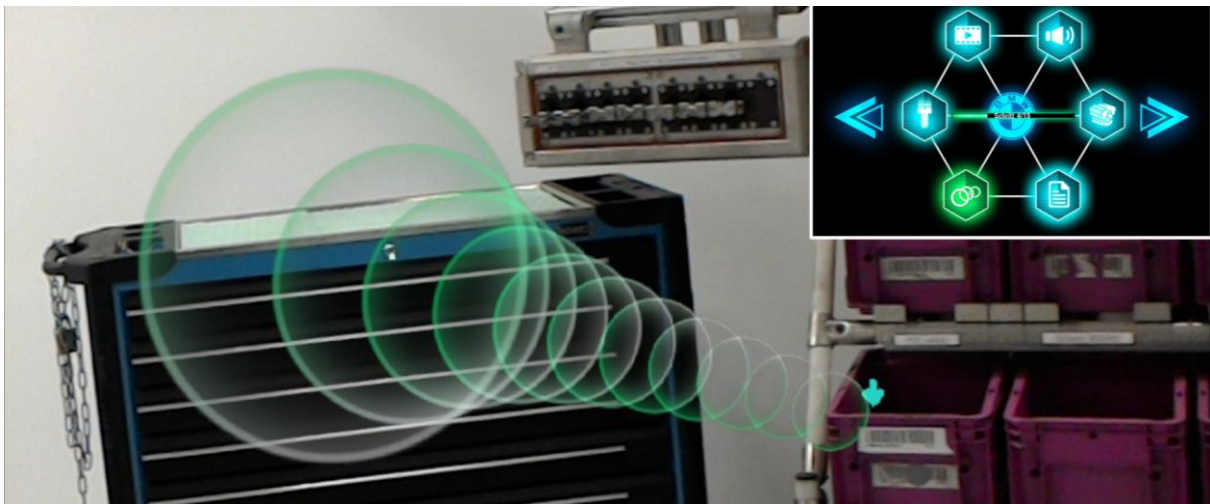


Abbildung 30: Augmented Reality Tunnel als Unterstützung zur Bauteil- & Werkzeugentnahme.

Quelle: eigene Darstellung.

¹⁴ Das SDK wird von der Holo-Light GmbH bereitgestellt und kann über folgende Website erworben werden: <https://holo-simulate.com/holomyo.html>

Aus den Ergebnissen der Nutzungskontextanalyse geht hervor, dass bei einem Montageschritt mehrere Teile entnommen werden müssen (vgl. Abbildung 23). Hierzu zählen die Bauteile, zusätzliche Materialien wie Schrauben und die zur Montage notwendigen Werkzeuge. Diese Teile befinden sich an unterschiedlichen Positionen bzw. in verschiedenen Boxen im Regal. Allerdings wird in der Abbildung 30 ersichtlich, dass immer nur eine Position durch den Tunnel angezeigt werden kann. Folglich muss diese nach der Entnahme eines Teils automatisch aktualisiert werden und den Nutzer zum nächsten Teil leiten. Dafür ist ein Trigger notwendig, welcher durch die Kollision von zwei virtuellen Quadern, sogenannten BoxCollidern¹⁵ mit physikalischen Eigenschaften (rigidbody), ausgelöst wird. Die nachfolgende Abbildung 31 veranschaulicht die Funktionsweise.

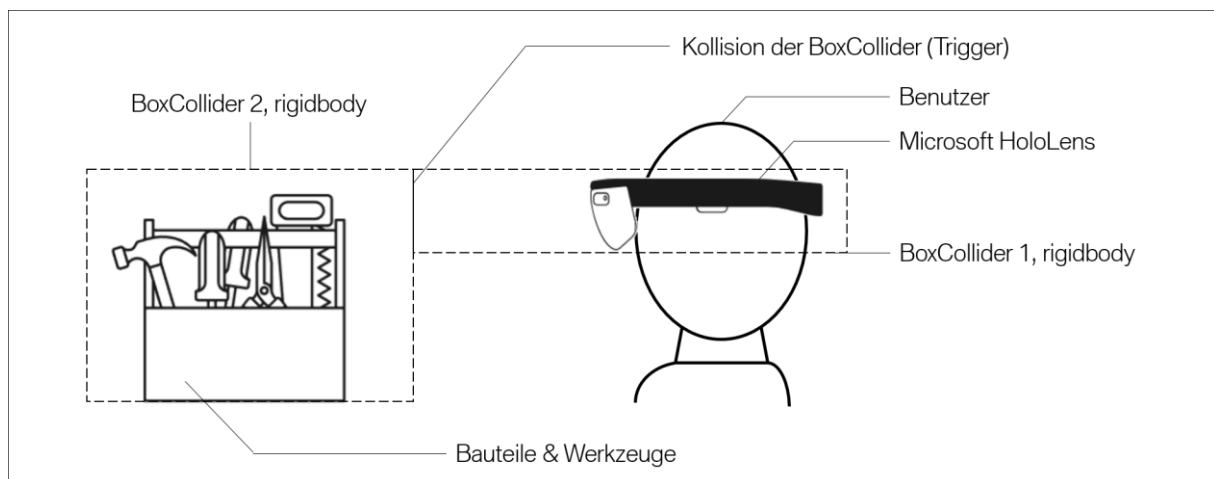


Abbildung 31: Funktionsweise der BoxCollider-Kollision.

Quelle: eigene Darstellung.

Um die Kollision der BoxCollider zu erfassen und den Trigger auszulösen, muss die Position der relevanten Teile und des Benutzers im dreidimensionalen Raum bekannt sein. Die Koordinaten der Teile resultieren aus deren Position im realen Raum und müssen konstant bleiben, um eine lagerichtige Darstellung des Tunnels zu gewährleisten. Sie stellen den Endpunkt des Tunnels dar. Im Gegensatz dazu ist die Position des Benutzers dynamisch. Diese kann über die Sensordaten der Microsoft HoloLens ermittelt werden. Sobald sich der Benutzer einem Bauteil bzw. Werkzeug nähert, um es zu entnehmen, erfolgt die Kollision der beiden BoxCollider und der Trigger wird ausgelöst. Dadurch wird die Endposition des Tunnels angepasst und der Benutzer wird zum nächsten Bauteil oder Werkzeug geleitet. Zusätzlich erhält der Benutzer beim Aktivieren des Triggers ein audiovisuelles Feedback. Dieses erfolgt in Form eines Signals, das über die Lautsprecher der Microsoft HoloLens ausgegeben und zusätzlich durch eine virtuelle grüne Wolke (Partikel-System¹⁶) dargestellt wird, die an der Position des entnommenen Teils erscheint.

5.2.6 Gestaltung des Inside-Out-Trackings

Mit dem Ziel die Bedienoberfläche ortsfest im realen Raum über dem Motor zu platzieren und die virtuellen 3D-Objekte korrekt am Motor darzustellen (vgl. Abschnitt 5.2.2), muss das Inside-Out-Tracking gestaltet

¹⁵ Weiterführende Informationen zum Thema BoxCollider können aus der Unity API entnommen werden: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/BoxCollider.html>

¹⁶ Weiterführende Informationen zum Thema Partikel-Systeme können aus der Unity Dokumentation entnommen werden: <https://docs.unity3d.com/Manual/ParticleSystems.html>

werden. Hierzu wurden verschiedene Ansätze im Abschnitt 4.3.2 beschrieben. Demnach eignet sich das **Extended Natural-Feature Tracking** besonders, um die genannten Ziele zu erreichen. Hierzu liefert Vuforia¹⁷ ein geeignetes SDK, welches alle notwendigen Softwarekompatibilitäten besitzt, um mit der Entwicklungsumgebung Unity3D eine Anwendung für die Microsoft HoloLens zu entwickeln.

Zunächst wird eine Referenz festgelegt, welche dazu dient, die Pose der Kamera zu bestimmen und dadurch die virtuellen Objekte im realen Raum lagerichtig darzustellen. Als Referenz wird ein kontrastreiches Bild verwendet. Dieses wird in der dreidimensionalen Entwicklungsumgebung (Unity3D) an den Koordinatenursprung (0,0,0) des kartesischen Koordinatensystems (x,y,z) platziert. Daraufhin werden die Positionen aller virtuellen Objekte ausgerichtet und als sogenannte Child-Objekte¹⁸ des kontrastreichen Bilds definiert. Dadurch werden die virtuellen Objekte immer relativ zur Position der definierten Referenz visualisiert. Mit dem Ziel die virtuelle Bedienoberfläche über dem Motor zu platzieren und die relevanten Teile an der korrekten Montageposition am Motor darzustellen, muss die Position der Referenz konstant bleiben. Eine Veränderung der Position hätte eine fehlerhafte Darstellung der virtuellen Objekte zur Folge und sollte vermieden werden. Bezogen auf den Anwendungsfall dieser Arbeit wird das kontrastreiche Bild ortsfest am Motor angebracht und so positioniert, dass es den Benutzer während der Ausführung seiner Tätigkeit nicht beeinträchtigt und das Tracking einfach initialisiert werden kann. Die nachfolgende Abbildung 32 verdeutlicht das beschriebene Konzept und die Darstellung in Unity3D bzw. in der Realität aus Sicht des Benutzers.

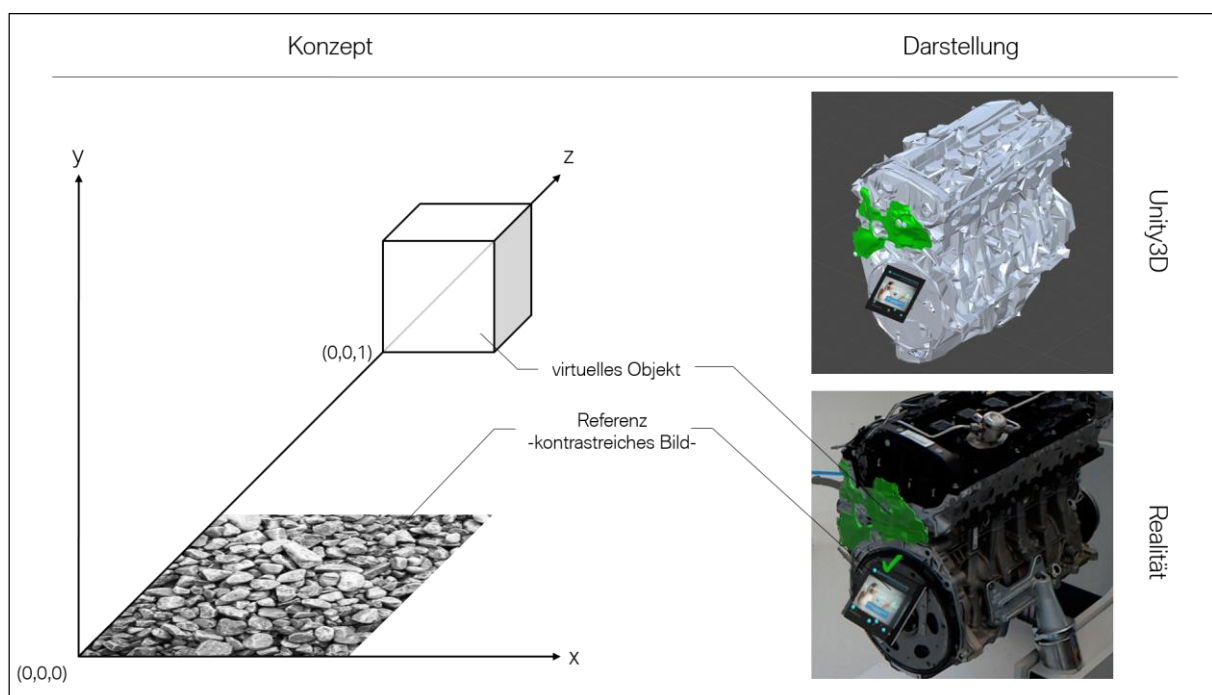


Abbildung 32: Konzept und Umsetzung des Natural-Feature Trackings.

Quelle: eigene Darstellung.

¹⁷ Weiterführende Informationen zum Thema Vuforia-basierte Anwendungsentwicklung für die Microsoft HoloLens können auf folgender Website entnommen werden: <https://library.vuforia.com/articles/Training/Developing-Vuforia-Apps-for-HoloLens>.

¹⁸ Weiterführende Informationen zu der hierarchischen Anordnung der virtuellen Objekte können aus der Unity Dokumentation entnommen werden: <https://docs.unity3d.com/Manual/Hierarchy.html>.

5.2.7 Zusammenfassung der Systemgestaltung

In diesem Abschnitt wurde mit Hilfe der verschiedenen Empfehlungen (vgl. Abschnitt 4.3.7) des Vorgehensmodells und den funktionalen Anforderungen der Benutzer (vgl. Tabelle 19) die Gestaltung des zweiten Artefakts dieser Dissertation beschrieben. Es ist ein Assistenzsystem, bestehend aus einem AR-basierten OST-HMD (Microsoft HoloLens) und einer Trainingssoftware, welche durch die Bereitstellung verschiedener Schwierigkeitsstufen sowohl Anfänger als auch Experten beim Erlernen einer Motormontage unterstützt. Die Abbildung 33 verdeutlicht die Verwendung des Systems. Über eine virtuelle Bedienoberfläche, welche ortsfest über dem Motor angeordnet ist, werden einem Benutzer multimodale Informationen bereitgestellt. Diese können je nach Bedarf per Sprachbefehl oder Gesteninteraktion abgerufen werden und unterstützen den Benutzer bei der Ausführung seiner Tätigkeit. Zusätzlich sollen Gamification-Elemente (z.B. ein virtueller animierter 3D-Charakter) dafür sorgen, die Motivation und das Engagement eines Benutzers während des Anlernprozesses zu steigern. Ein Extended Natural-Feature Tracking stellt zudem sicher, dass die Positionen der virtuellen Objekte im realen Raum korrekt dargestellt werden und konstant bleiben. Um die Nützlichkeit des zweiten Artefakts zu überprüfen, fordert die gestaltungsorientierte Forschung dessen Evaluation (vgl. Abbildung 8). Diese erfolgt im Rahmen geeigneter Fallstudien unter Verwendung der Evaluationsmethodik des zuvor erarbeiteten Vorgehensmodells (vgl. Abbildung 21) in den nachfolgenden Abschnitten dieses Kapitels.



Abbildung 33: Verwendung der HMD-basierten Trainingsanwendung als Montageunterstützung.

Quelle: eigene Darstellung.

5.3 Erste Formative Evaluation

In diesem Abschnitt erfolgt die initiale Erprobung des zuvor beschriebenen Systems mit der Evaluationsmethodik des Vorgehensmodells (vgl. Abbildung 21). Damit wird die Nützlichkeit des ersten und des zweiten Artefakts dieser Dissertation überprüft (vgl. Abbildung 6). Die nachfolgenden Unterabschnitte geben Auskunft über den Aufbau der Versuchsumgebung, des Versuchsdesigns, der Versuchsteilnehmer, des konkreten Versuchsablaufs und der Ergebnisse der formativen Evaluation. Aus den Ergebnissen, welche die Entdeckungen und Limitationen der Artefakte offenlegen, werden neue wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen (vgl. Abbildung 8). Darüber hinaus können Lösungsvorschläge zur Schließung der Limitationen gebildet werden, welche zur iterativen Anpassung der Artefakte führen.

5.3.1 Aufbau der Versuchsumgebung

Für die Evaluation des Systems ist eine geeignete Versuchsumgebung notwendig. Bei deren Gestaltung müssen die nicht-funktionalen Nutzeranforderungen (vgl. Tabelle 19) und die Empfehlungen von Regenbrecht et al. [91], welche durch die strukturierte Literaturrecherche ermittelt wurden, berücksichtigt werden. Demnach sollte die Systemerprobung außerhalb der taktgebunden Fließbandproduktion erfolgen, um Störungen im Produktionsablauf zu vermeiden. Dabei muss der Versuchsaufbau den Gegebenheiten des Nutzungskontexts entsprechen und in unmittelbarer Nähe zum Benutzer aufgebaut werden, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und eine schnelle Zugänglichkeit sicherzustellen. Darüber hinaus stellt die örtliche Nähe der Versuchsumgebung zur Produktion sicher, dass der Benutzer Hilfe (vom Trainer) anfordern kann, wenn er diese zur Absolvierung seiner Arbeitsaufgabe benötigt.

Der Versuchsaufbau setzt sich aus drei Bereichen zusammen. Im Montagebereich findet die wertschöpfende Tätigkeitsausführung statt. Hier montiert der Benutzer den Reihensechszylinder-Benzinmotor (B58) unter Zuhilfenahme der HMD-basierten Trainingsanwendung. Der Motor ist auf einem fahrerlosen Transportsystem positioniert. Am Motor befindet sich das im Abschnitt 5.2.6 beschriebene kontrastreiche Referenzbild, welches für die korrekte Darstellung der virtuellen Informationen relevant ist. Für die Montage des Motors sind verschiedene Werkzeuge notwendig. Diese befinden sich im Werkzeugbereich an definierten Positionen. Zu den Werkzeugen zählen ein Schrauber mit vier verschiedenen Aufsätzen (Innen- und Außen-Torx), ein Maulschlüssel und ein Hammer. Alle Bauteile, welche für die 15 Montageschritte des ersten Takts der B58-Motormontage notwendig sind, befinden sich in verschiedenen Boxen in einem Regal. Aus dieser bereitgestellten Gesamtmenge müssen die Benutzer die Bauteile kommissionieren, welche für den entsprechenden Montageschritt benötigt werden. Die nachfolgende Abbildung 34 zeigt den beschriebenen Versuchsaufbau mit den genannten drei Bereichen.

Der Versuchsaufbau wird für alle Evaluationen dieser Arbeit verwendet. Er entspricht einem realen Arbeitsplatz in einer flexiblen manuellen Montage. Dadurch wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere industrielle Montageanwendungen gewährleistet. Dies ist bei den meisten wissenschaftlichen Publikationen nicht gegeben, da die Evaluationen hauptsächlich im Laborkontext mit einfachen Anwendungsfällen und geringer Komplexität durchgeführt werden [162]. Die vorliegende Dissertation liefert somit erste wissenschaftliche Erkenntnisse zum Einsatz HMD-basierter Trainingsanwendungen im industriellen Nutzungskontext.



Abbildung 34: Aufbau der Versuchsumgebung.

Quelle: eigene Darstellung.

5.3.2 Versuchsdesign

Das Versuchsdesign dieser ersten Erprobung orientiert sich an der formativen Evaluationsmethodik des Vorgehensmodells (vgl. Abbildung 21). Demnach absolviert jeder Versuchsteilnehmer (unabhängige Variable) die 15 Montageschritte des ersten Takts der B58-Motormontage unter zu Hilfenahme der HMD-basierten Trainingsanwendung. Da sich diese in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befindet, können die Versuchsteilnehmer lediglich die ersten zwei Level der Anwendung testen (vgl. Abbildung 26). Auf eine Erhebung quantitativer Messdaten hinsichtlich der Effektivität und der Effizienz des Systems wird daher in der ersten formativen Evaluation verzichtet. Die Erprobung dient vielmehr dazu, die Meinungen der Benutzer zu erfassen und sowohl die pragmatische als auch die hedonische Qualität des Systems zu bewerten (abhängige Variablen). Dafür werden die Probanden während der Ausführung der Montagetätigkeit von zwei Evaluatoren observiert, welche ihre qualitativen Beobachtungen schriftlich festhalten. Nachdem ein Versuchsteilnehmer beide Level erfolgreich absolviert hat, wird dieser gebeten, seine Gedanken, Meinungen, Gefühle und Empfindungen laut zu äußern. Auf Basis dieser Verbalisierungen und den handschriftlich dokumentierten Beobachtungen kann einer der Evaluatoren gezielte Nachfragen stellen. Dabei dokumentiert der zweite Evaluator alle Aussagen, welche auf Systemschwachstellen hinweisen, in handschriftlicher Form. Ergänzend dazu kommen die SUS und der AttrakDiff zum Einsatz (siehe Anhang). Die SUS liefert eine quantitative Zahl zwischen 0 und 100, welche zur Beurteilung der Gesamt-Gebrauchstauglichkeit des Systems dient. Der AttrakDiff gibt Auskunft über die pragmatische Qualität (PQ),

die Attraktivität (ATT), die hedonische Qualität- Identifikation (HQ-I) und die hedonische Qualität-Stimulation (HQ-S). Dabei beschreibt HQ-I, wie sehr sich ein Benutzer mit dem System identifizieren kann. Die HQ-S bildet ab, inwieweit das System einen Benutzer durch neuartige, interessante oder anregende Funktionalitäten bei der persönlichen Weiterentwicklung unterstützt. Mit Hilfe der qualitativen Nutzerausagen und den quantitativen Erkenntnissen aus den standardisierten Fragebögen können Schwachstellen aufgezeigt und auf deren Basis Optimierungspotentiale abgeleitet werden.

5.3.3 Versuchsteilnehmer

An der initialen Evaluation des Systems nehmen 8 männliche und 2 weibliche Probanden teil ($M = 30,5$ Jahre; $SD = 7,45$ Jahre). Keiner von den Versuchsteilnehmern hat zuvor weder die HMD-basierte Trainingsanwendung getestet noch den Motor montiert. Drei der Probanden sind junge Büroangestellte ($M = 23,3$ Jahre alt; $SD = 1,24$) mit geringer Nutzungserfahrung von AR-basierten Systemen ($M = 1,33$; $SD = 0,47$) und keiner Erfahrung in der manuellen Montage. Weitere vier Probanden sind Montagearbeiter ($M = 30,25$ Jahre alt; $SD = 6,57$) aus einer Montagelinie der BMW Group in München. Sie haben viel Erfahrung mit manuellen Montagetätigkeiten ($M = 3,00$; $SD = 0$) und keine Erfahrung im Umgang mit AR-basierten Systemen. Neben den Montagearbeitern nehmen drei Trainer ($M = 38,00$ Jahre alt; $SD = 4,32$) an der Systemerprobung teil. Sie haben sehr viel Erfahrung in der manuellen Montage ($M = 4,00$; $SD = 0$), allerdings keine Erfahrung mit AR-basierten Systemen. Durch die verschiedenen Kenntnisse im Bereich der manuellen Montage und der Verwendung von AR-basierten Systemen ergeben sich verschiedenen Sichtweisen auf die Gebrauchstauglichkeit des Assistenzsystems (vgl. Abschnitt 4.4.1). Dadurch können viele Systemschwachstellen aufgedeckt werden, welche schließlich zu einer besseren Neugestaltung des Assistenzsystems führen.

5.3.4 Versuchsablauf

Vor Beginn des Versuchs erfolgt zunächst die Akquise der Versuchsteilnehmer. Die Büroangestellten werden über eine Umfrage, in Form einer E-Mail, rekrutiert und zufällig ausgewählt. Die Probanden aus der manuellen Montage werden von ihren Vorgesetzten selektiert. Dazu werden die Führungskräfte im Vorfeld über den Inhalt und die ungefähre Dauer des Versuchs informiert. Die Versuchsdauer wird auf zwei Stunden je Proband festgelegt. Für diesen Zeitraum werden die Personen aus der Montage durch einen Springer ersetzt (vgl. Abschnitt 3.4.5). Alle Versuchsteilnehmer werden vor Beginn des Versuchs gebeten, entsprechende Arbeitskleidung und Sicherheitsschuhe mitzubringen.

Der Versuch startet mit einer Begrüßung aller Probanden, gefolgt von einer Erläuterung des Versuchs sowie der Versuchsumgebung. Zusätzlich dazu werden alle Teilnehmer explizit darauf hingewiesen, sich bemerkbar zu machen, sobald sie ein Unwohlsein verspüren und den Versuch abbrechen wollen. Nach dieser kurzen Einführung wird der mittlere Augenabstand, die sogenannte Interpupillardistanz (IPD), jedes Probanden manuell mit einem Lineal gemessen und die Microsoft HoloLens daraufhin individuell eingestellt. Dies ist wichtig, um eine korrekte räumliche Darstellung der virtuellen Inhalte zu gewährleisten. Im Anschluss daran erfolgt die ergonomische Einstellung bzw. Positionierung des HMDs auf dem Kopf des Benutzers. Hierfür empfiehlt es sich, anstatt der Nasenhalterung den Kopfbügel zu verwenden (vgl. Abbil-

dung 18). Dadurch wird das Gewicht des HMDs gleichmäßig auf dem Kopf verteilt, wodurch der Tragekomfort erhöht wird. Neben der Microsoft HoloLens erhält jeder Benutzer das vibrotaktile Armband (vgl. Abschnitt 5.2.5). Danach erfolgt eine kurze Einweisung in die Interaktionsmodalitäten (vgl. Abbildung 29). Hierzu wird eine Anwendung („Learn Gesture“) genutzt, welche standardmäßig auf dem HMD installiert wird. Im Anschluss daran wird jeder Proband gebeten, die B58-Trainingsanwendung zu öffnen, den Anweisungen der Software zu folgen und mit den bereitgestellten Informationen den Motor zu montieren. Nachdem die Einführung (Level 1) erfolgreich abgeschlossen wurde, erfolgt eine zehnminütige Pause. Während dieser kurzen Unterbrechung demontieren die Evaluatoren den Motor. Der Benutzer kann das HMD absetzen, sich ausruhen und an dem Buffet bedienen, das als Vergütung für die Versuchsteilnahme zur Verfügung gestellt wird. Anschließend wird der Proband erneut gebeten, den Motor zu montieren. Dabei nutzt er das HMD mit der Trainingsanwendung und den bereitgestellten Informationen des Anfänger-Levels (Level 2). Während der zwei Montagephasen (Level 1 & Level 2) protokollieren die Evaluatoren ihre Beobachtungen.

Nachdem der Benutzer das zweite Level erfolgreich abgeschlossen hat, wird dieser gebeten, seine Meinung, Gedanken und Gefühle hinsichtlich der Software und der Hardware zu verbalisieren. Die Äußerungen werden von einem der Evaluatoren handschriftlich festgehalten. Der zweite Evaluator stellt zusätzlich gezielte Nachfragen. Neben dieser qualitativen Bewertung werden die Probanden gebeten, zwei Fragebögen auszufüllen. Dabei werden die Fragen der SUS handschriftlich beantwortet, die Fragen des Attrak-Diff online am PC. Der nachfolgende Abschnitt gibt Auskunft über die qualitativen und quantitativen Ergebnisse der ersten formativen Evaluation.

5.3.5 Ergebnisse

Bei der Befragung der zehn Probanden ergab sich für die SUS ein Mittelwert von 83,5 (SD= 12,5). Die zusätzliche elfte Frage des Fragebogens nach Bangor et al. [200], welche die Gesamt-Gebrauchstauglichkeit des Systems erfragt, beantworteten sechs Personen mit „Gut“ und vier Personen mit „Exzellent“. Die nachfolgende Abbildung 35 zeigt die Einordnung der erzielten SUS in die verschiedenen Bewertungsskalen. Demnach ist das System mit einer SUS von 83,5 nahezu exzellent. Es ergibt sich eine Schulnote von 2, was dem Akzeptanzbereich akzeptabel entspricht.

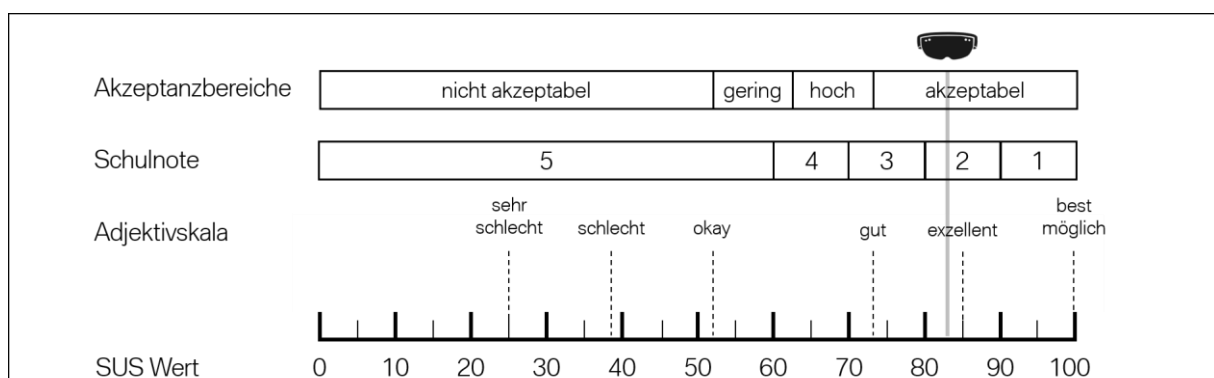


Abbildung 35: SUS- Erste formative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

Die Ergebnisse des AttrakDiff, welche sich durch eine online Befragung der zehn Versuchsteilnehmer ergeben, lieferten für die PQ einen Mittelwert von 1,16 mit einer Konfidenz von 0,80 und für die HQ einen Mittelwert von 1,27 mit einer Konfidenz von 0,55. Die mittlere Ausprägung beider Dimensionen (PQ & HQ) und das entsprechende Konfidenzrechteck wird in einem Ergebnisportfolio in der nachfolgenden Abbildung 36 grafisch dargestellt. Zusätzlich dazu ist das Profil-der-Wortpaare, welches die mittleren Ausprägungen der jeweiligen gegensätzlichen Wortpaare des AttrakDiff aufgezeigt, in der Abbildung 36 dargestellt. Diese geben Aufschluss über die PQ, die HQ-I, die HQ-S und die ATT. Hier sind besonders die Extremwerte interessant, welche die gut und schlecht gelösten Eigenschaften der Anwendung veranschaulichen. Demnach gaben die Benutzer die folgenden negativen Attribute an: technisch, trennt mich. Im Gegensatz zu diesen negativen Attributen bewerteten die Benutzer die HMD-basierte Trainingsanwendung mit den positiven Attributen: gut, wertvoll und kreativ.

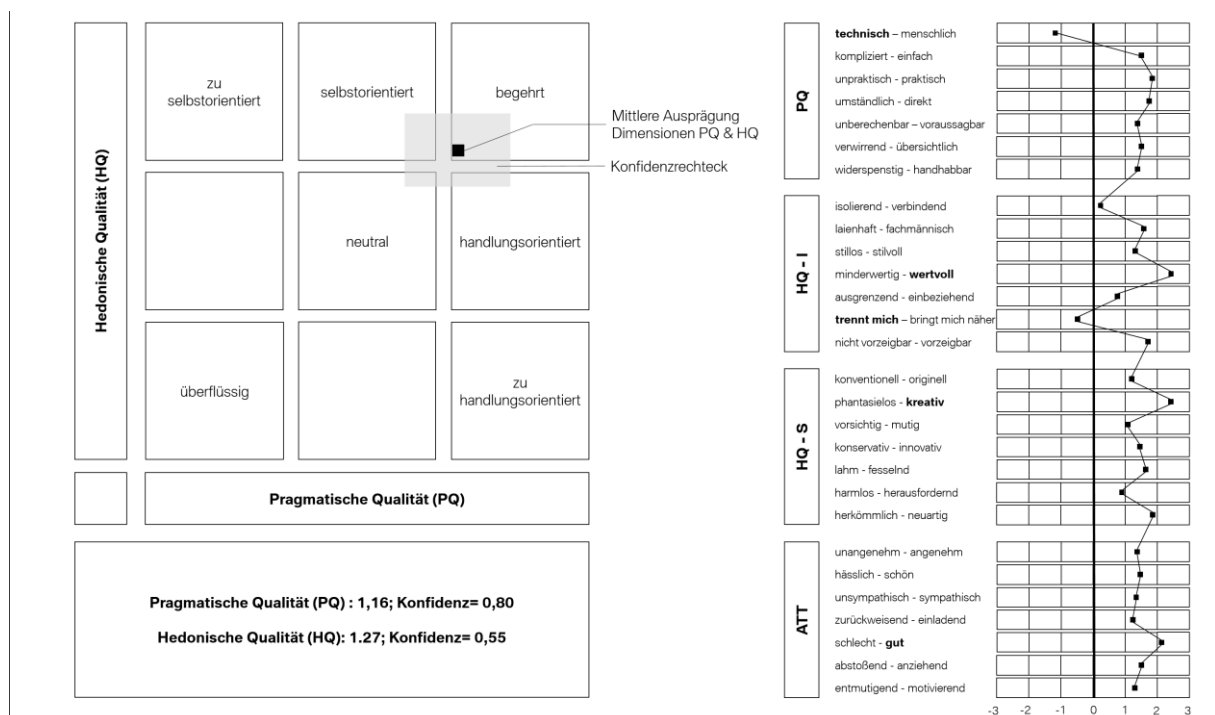


Abbildung 36: Ergebnis des AttrakDiffs– erste formative Evaluation.

Quelle: in Anlehnung an die Ergebnisdarstellung von www.attrakdiff.de.

Neben den standardisierten Fragebögen, welche quantitative Ergebnisse lieferten, wurden qualitative Daten in Form von schriftlich dokumentierten Beobachtungen und Nutzeraussagen erfasst, um das Trainingssystem zu bewerten. Die wesentlichen sind nachfolgend aufgeführt:

- Die Benutzer empfanden das vibrotaktile Armband an ihrem Unterarm als störend, da es relativ groß ist und während der Benutzung Konnektivitätsprobleme auftraten. Dadurch kam es zu unkontrollierten Vibrationen des Armbands während der Benutzung, was zu Irritationen der Versuchsteilnehmer führte.
- Das Deaktivieren und erneute Aktivieren der Video-Funktionalität, welche für einen Neustart der Videoinstruktionen notwendig sind, wurde von den Probanden als störend empfunden und sollte zukünftig einfacher gestaltet werden.

- Aus der Observation der Probanden während des Versuchs geht hervor, dass die Benutzer häufig falsche Schrauben entnehmen. Eine Verwechslung konnte insbesondere zwischen den M6x16 Innentorx und M6x16 Außentorx Schrauben beobachtet werden.

5.3.6 Diskussion der Ergebnisse

Die SUS weist mit einem Wert von 83,5 bereits nach der ersten Evaluation einen überdurchschnittlich hohen Wert auf. Dieser liegt nach Bangor et al. [200] bei 69,5. Demnach handelt es sich bei der HMD-basierten Trainingsanwendung um einen high-fidelity Prototyp mit nahezu ausgereiften Funktionalitäten (vgl. Abschnitt 4.3). Diese Erkenntnis wird durch das Ergebnis des AttrakDiffs untermauert. Demnach verdeutlicht die mittlere Ausprägung der Dimensionen PQ und HQ, dass die Anwendung begehrt ist und sowohl pragmatische als auch hedonische Aspekte adressiert. Allerdings weist das Konfidenzrechteck eine relativ große Ausdehnung auf und erstreckt sich über die Charakterbereiche begehrt, handlungsorientiert, neutral und selbstorientiert. Dadurch sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Bewertung der Trainingsanwendung einem bestimmten Bereich zuordnen lässt. Somit bestehen Optimierungspotenziale hinsichtlich der pragmatischen und hedonischen Aspekte. Auf Basis der Nutzeraussagen und den Erkenntnissen aus den Beobachtungen der Probanden lassen sich Maßnahmen ableiten, welche schließlich zur Optimierung führen.

Das vibrotaktile Myo-Armband wird nicht länger verwendet. Die Video-Funktionalität wird optimiert und mit einer virtuellen Wiedergabetaste (engl. Repeat-Button) ausgestattet. Diese wird im Informationsfenster positioniert und ermöglicht einem Benutzer die Wiederholung des Videos, ohne das Deaktivieren und erneute Aktivieren der Funktionalität. Durch die Einsparung einer Nutzerinteraktion wird der Dialog (vgl. Abschnitt 4.3.3) effizienter gestaltet. Neben dem Video wird die Text-Funktionalität optimiert, da durch die Observationen festgestellt wurde, dass die Probanden ähnliche Schrauben verwechselten, was zu einer fehlerhaften Bauteilentnahme führte. Um den Unterschied ähnlicher Schrauben deutlich hervorzuheben, wird die Schriftfarbe im Textfeld rot hervorgehoben.

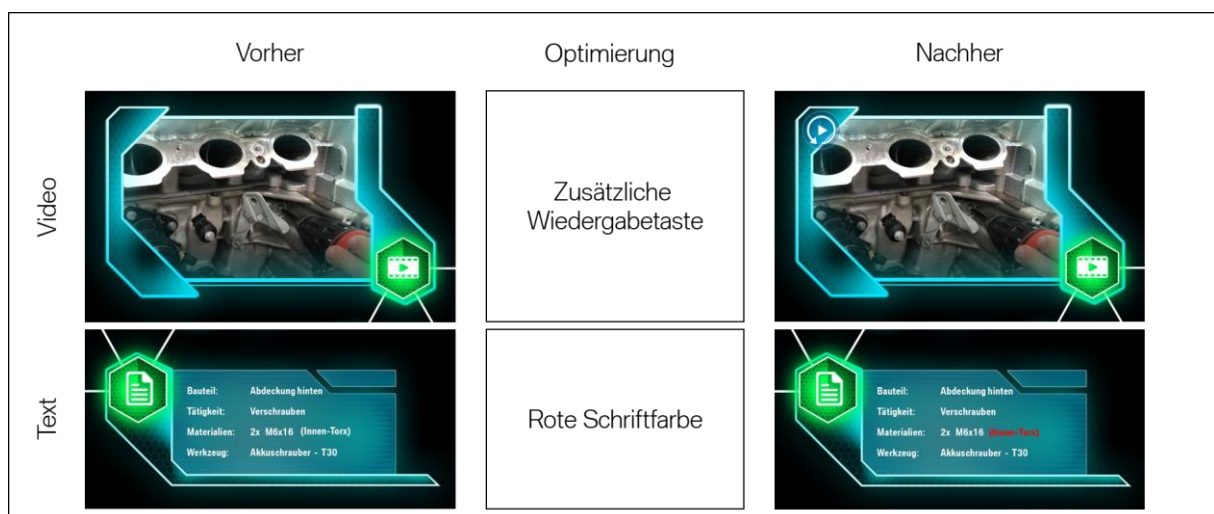


Abbildung 37: Optimierung der virtuellen Bedienoberfläche nach der ersten Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

5.3.7 Zusammenfassung der ersten formativen Evaluation

Im Rahmen dieser formativen Evaluation wurde der erste Prototyp der HMD-basierten Trainingsanwendung von zehn repräsentativen Nutzern erprobt, um die Gebrauchstauglichkeit zu bewerten. Mit dem Ziel die Ergebnisse auf reale industrielle Anwendungsfälle zu übertragen, wurde der Versuch am Beispiel eines adäquaten Montagearbeitsplatzes mit realer Arbeitsaufgabe durchgeführt. Da sich die Trainingsanwendung zu dem Zeitpunkt der Erprobung in einem sehr frühen Entwicklungsstatus befand, konnten die Benutzer lediglich zwei Level (Einführung und Anfänger) testen. Aufgrund dessen wurde das Versuchsdesign der zuvor erarbeiteten Evaluationsmethodik (vgl. Abschnitt 4.4.3) leicht angepasst. Auf eine Erhebung quantitativer Messgrößen zur Bewertung der Effektivität und Effizienz der Anwendung wurde zunächst verzichtet. Der Fokus dieser ersten formativen Evaluation lag primär auf der Erhebung qualitativer Daten in Form von Aussagen und dem Verhalten der Benutzer sowie quantitativer Daten zur Bewertung pragmatischer und hedonischer Systemaspekte. Hierzu wurden standardisierte Fragebögen wie die SUS und der AttrakDiff verwendet und die Erkenntnisse aus der Observation und den Verbalisierungen schriftlich dokumentiert. Dadurch konnten wertvolle Informationen gesammelt werden. Die Ergebnisse der zwei Fragebögen zeigen auf, dass die Trainingsanwendung bereits eine hohe Gebrauchstauglichkeit besitzt und sowohl pragmatische als auch hedonische Aspekte adressiert. Allerdings geht aus den Aussagen der Benutzer und den Beobachtungen auch hervor, dass Optimierungspotentiale bestehen. Die wesentlichen wurden im Abschnitt 5.3.6 diskutiert und die Trainingssoftware daraufhin angepasst.

5.4 Zweite Formative Evaluation

In diesem Abschnitt wird die optimierte HMD-basierte Trainingsanwendung erneut evaluiert, um die Gebrauchstauglichkeit zu überprüfen und weitere Schwachstellen zu identifizieren. Für diese formative Evaluation wurde die Trainingsanwendung auf Basis der zuvor identifizierten Optimierungspotentiale angepasst und alle Level (vgl. Abbildung 26) ausprogrammiert. Die Erprobung erfolgt dabei am Beispiel der B58-Motormontage (vgl. Abschnitt 5.1.6) an dem im Abschnitt 5.3.1 beschriebenen AP. Dadurch können die Benutzer die Anwendung vollumfänglich testen. Die nachfolgenden Unterabschnitte geben Auskunft über das Versuchsdesign, die Versuchsteilnehmer, den konkreten Versuchsablauf und die Ergebnisse dieser zweiten formativen Evaluation. Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert, wodurch sich weitere wissenschaftliche Erkenntnisse und Optimierungspotentiale ergeben. Auf deren Basis wird die HMD-basierte Trainingsanwendung erneut angepasst. Die Ergebnisse dieses Experiments sind teilweise in dem wissenschaftlichen Beitrag von Werrlich et al. [218] publiziert.

5.4.1 Versuchsdesign

Auf Grundlage der Empfehlung von Nielsen und Landauer [191] wird für den Versuch ein between-subject Design mit drei Gruppen zu je fünf Versuchsteilnehmern verwendet (vgl. Abschnitt 4.4.1). Dabei wird die formative Evaluationsmethodik genutzt, die durch das erste Artefakt dieser Dissertation, das Vorgehensmodell, vorgegeben wird (vgl. Abbildung 21). Als unabhängige Variablen werden die Vorkenntnisse definiert, welche die Probanden im Bereich der manuellen Montage und der Erprobung von AR-basierten Systemen besitzen. Mit dem Ziel das Trainingssystem hinsichtlich seiner Effektivität, Effizienz sowie prag-

matischen und hedonischen Faktoren zu evaluieren, werden verschiedene abhängige Variablen gemessen. Die Montagefehler (AM), selbst-korrigierten Montagefehler (CAM), durch Hilfe korrigierten Montagefehler (CBHA), Entnahmefehler (PM), selbst-korrigierten Entnahmefehler (CPM), durch Hilfe korrigierten Entnahmefehler (CBHP) werden erhoben, um die Effektivität des Trainingssystems zu bewerten. Dabei werden AM protokolliert, wenn ein Versuchsteilnehmer ein Bauteil vergisst zu montieren bzw. Montageschritte auslässt oder ein Bauteil an eine falsche Stelle montiert. PM werden schriftlich festgehalten, sobald ein Proband Bauteile vergisst oder falsche Bauteile entnimmt. Sofern diese Fehler im Verlauf des Montageprozesses von dem Versuchsteilnehmer selbständig korrigiert werden, werden CAM bzw. CPM dokumentiert. Wenn der Proband Schwierigkeiten hat, die Tätigkeit mit den durch die Trainingsanwendung bereitgestellten Informationen auszuführen, kann er einen der Evaluatoren um Hilfe bitten. In diesem Fall werden die abhängigen Variablen CBHA und CBHP schriftlich festgehalten. Zur Beurteilung der Effizienz des Trainingssystems wird die Zeit zur Bewältigung des Einführung-Levels (TLCT), des Anfänger-Levels (BLCT), des Fortgeschritten-Levels (ILCT) und des Experte-Levels (ELCT) gemessen.

Nachdem die vier Trainingslevel erfolgreich absolviert wurden, werden die Probanden gebeten, die Montage ohne Unterstützung der HMD-basierten Anwendung zu wiederholen. Während dieses Tests werden die Montagefehler (AM2), selbst-korrigierten Montagefehler (CAM2), durch Hilfe korrigierten Montagefehler (CBHA2), Entnahmefehler (PM2), selbst-korrigierten Entnahmefehler (CPM2), durch Hilfe korrigierten Entnahmefehler (CBHP2), Reihenfolgefehler (SM), selbst-korrigierten Reihenfolgefehler (CSM), durch Hilfe korrigierten Reihenfolgefehler (CBHS) und die Zeit zur Bewältigung der 15 Montageschritte gemessen (IRCT). Darüber hinaus werden wie bei der ersten formativen Evaluation (vgl. Abschnitt 5.3.2) die SUS zur Bewertung der Gesamt-Gebrauchstauglichkeit des Systems und der AttrakDiff zur Beurteilung der pragmatischen Qualität (PQ), der Attraktivität (ATT), der hedonischen Qualität-Identifikation (HQ-I) und der hedonischen Qualität-Stimulation (HQ-S) des Trainingssystems verwendet. Zusätzlich dazu wird der NASA-TLX verwendet, um die subjektiv wahrgenommene Beanspruchung der Probanden während des Versuchs zu messen. Hierzu verwendet der Fragebogen sechs Subskalen, welche Rückschlüsse auf die mentale Beanspruchung (MD), die physische Beanspruchung (PD), die zeitliche Beanspruchung (TD), die Leistung (P), die Anstrengung (E) und die Frustration (F) der Benutzer liefern. Ergänzend zu den bereits genannten quantitativen Daten werden qualitative Daten in Form von Nutzeraussagen schriftlich dokumentiert. Mit Hilfe dieses Methodenmix ergeben sich umfassende Erkenntnisse hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit des Trainingssystems, wodurch eine optimale Systemneugestaltung möglich wird.

5.4.2 Versuchsteilnehmer

Für den Versuch werden 15 Versuchsteilnehmer (13 männlich, 2 weiblich) akquiriert. Das Alter der Probanden schwankt zwischen 21 und 42 Jahren ($M = 30,06$; $SD = 6,20$). Die Probanden werden auf Basis ihrer Erfahrung im Bereich der manuellen Montage und der Erprobung von AR-Systemen in drei gleichgroße Gruppen zu je fünf Personen eingeteilt. Deren Erfahrung wird mit Hilfe einer fünfstufigen Likert-Skala, welche von „wenig“ bis „viel“ Erfahrung reicht, erhoben. Dabei erhält die Angabe „wenig Erfahrung“ null Punkte und die Angabe „viel Erfahrung“ wird mit vier Punkten bewertet. Die erste Gruppe, bestehend aus fünf Büroangestellten, gibt an, wenig Erfahrung im AR-Bereich ($M = 0,20$; $SD = 0,40$) und mittlere Er-

fahrung im Bereich der manuellen Montage ($M = 1,60$; $SD = 1,35$) zu besitzen. Die zweite Gruppe, bestehend aus fünf Montagearbeitern, verfügt über wenig Erfahrung mit der Erprobung von AR-basierten Systemen ($M = 0,40$; $SD = 0,49$) und viel Erfahrung im Kontext der manuellen Montage ($M = 3,80$; $SD = 0,40$). Die Teilnehmer der dritten Gruppe (AR-Experten) haben sehr viel Erfahrung im Umgang mit AR-basierten Systemen ($M = 4,00$; $SD = 0,00$) und mittlere Erfahrung mit manuellen Montageprozessen ($M = 2,00$; $SD = 0,63$). Durch die unterschiedlichen Kenntnisse der Versuchsteilnehmer im Kontext der manuellen Montage und der Erprobung AR-basierter Systeme ergeben sich verschiedene Sichtweisen auf das System. Dadurch wird eine optimale Systemneugestaltung möglich. Alle Probanden beherrschen die deutsche Sprache und sind in der Lage, diese zu verstehen, zu lesen und zu schreiben. Diese Voraussetzung ist wichtig, da alle Instruktionen der Trainingsanwendung in Deutsch ausgegeben werden.

5.4.3 Versuchsablauf

Vor Beginn des Experiments werden 15 Versuchsteilnehmer akquiriert, die zuvor nicht an dem Versuch teilgenommen haben und keine Erfahrung mit der Montage des ausgewählten Motors aufweisen. Die Probanden der ersten Gruppe werden über eine Umfrage, in Form einer E-Mail, rekrutiert und zufällig ausgewählt. Die Probanden der zweiten Gruppe werden von ihrem Vorgesetzten selektiert. Für die Dauer des Versuchs, welche auf drei Stunden festgelegt wird, werden die Personen aus der Montage durch einen Springer ersetzt (vgl. Abschnitt 3.4.5). Die Probanden der dritten Gruppe werden über eine öffentliche Ausschreibung rekrutiert. Im Gegensatz zu allen anderen Versuchsteilnehmern wird deren Teilnahme vergütet. Vor Beginn des Experiments werden alle Personen gebeten, entsprechende Arbeitskleidung und Sicherheitsschuhe mitzubringen.

Nach einer kurzen Begrüßung des Probanden werden der Versuch und die Versuchsumgebung von einem Evaluator erläutert. Zusätzlich wird darauf hingewiesen, dass die Person den Versuch jederzeit abbrechen kann, wenn sie ein Unwohlsein verspürt. Nachdem die Einführung abgeschlossen ist, wird die IPD gemessen und die Microsoft HoloLens daraufhin individuell eingestellt, um eine korrekte räumliche Darstellung der virtuellen Inhalte zu gewährleisten. Danach wird das HMD auf dem Kopf des Benutzers positioniert und von einem Evaluator ergonomisch eingestellt. Hierfür wird anstatt der Nasenhalterung der Kopfbügel (vgl. Abbildung 18) verwendet, welcher das Gewicht des HMDs gleichmäßig auf dem Kopf des Benutzers verteilt und dadurch einen hohen Tragekomfort sicherstellt. Im Anschluss daran erhält der Proband eine kurze Einweisung in die Interaktionsmodalitäten (vgl. Abbildung 29) mit der standardmäßig installierten Anwendung (Learn Gesture) des HMDs. Danach startet der eigentliche Versuch, der sich in eine Trainings- und eine Testphase gliedert. In der Trainingsphase absolviert der Proband die verschiedenen Level (vgl. Abbildung 26) der Trainingssoftware, wobei der Motor viermal montiert wird. Währenddessen erheben zwei Evaluatoren quantitative Daten hinsichtlich der Effektivität und Effizienz des Trainingssystems (vgl. Abschnitt 5.4.1). Nachdem ein Level erfolgreich abgeschlossen wurde, erfolgt eine zehnmünütige Pause. Während dieser kurzen Unterbrechung wird der Motor demontiert und der Benutzer gebeten, das HMD abzusetzen, sich ausruhen und an dem Buffet zu bedienen, welches als Vergütung für die Versuchsteilnahme zur Verfügung gestellt wird. Nachdem die Trainingsphase beendet ist und alle Level erfolgreich absolviert wurden, wird der Proband gebeten, die Montage ein letztes Mal ohne die Unterstützung der HMD-basierten Trainingsanwendung zu wiederholen. Während dieser Testphase werden die

Montagezeit, die Montage-, die Entnahme- und die Reihenfolgefehler (vgl. Abschnitt 5.4.1) von zwei Evaluatoren erhoben.

Nachdem die Trainings- und Testphase beendet sind, wird der Proband aufgefordert, seine Gedanken und Gefühle verbal zu äußern. Zusätzlich geht einer der Evaluatoren durch gezielte offene Fragen auf die Aussagen des Probanden ein. Dabei werden relevante Verbalisierungen, welche Hinweise auf mögliche Systemschwachstellen geben, von einem der zwei Evaluatoren schriftlich festgehalten. Ergänzend dazu wird der Benutzer gebeten, den NASA-TLX, die SUS und den AttrakDiff auszufüllen. Der nachfolgende Abschnitt gibt Auskunft über die Ergebnisse der zweiten formativen Evaluation.

5.4.4 Ergebnisse

Die Auswertung der verschiedenen quantitativen Daten erfolgte mit Hilfe der Software IBM SPSS Statistics. Zunächst wurden die Zeiten analysiert, welche die Versuchsteilnehmer zur Absolvierung der einzelnen Trainingsphasen und der Testphase benötigten. Dabei ergab sich die in der nachfolgenden Tabelle 20 aufgezeigte deskriptive Statistik für die Effizienzmessgrößen.

Tabelle 20: Deskriptive Statistik der Effizienzmessgrößen– zweite formative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

Phasen	Messgrößen	Gruppe 1 -Büroangestellte-		Gruppe 2 -Montagearbeiter-		Gruppe 3 -AR Experten-		Gesamt	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Trainingsphase	TLCT [s]	2608,20	458,58	2992,60	759,22	2704,80	163,85	2745,20	500,97
	BLCT [s]	1396,00	149,62	1389,40	639,90	1273,20	212,36	1352,86	373,74
	ILCT [s]	1167,20	145,87	971,40	330,71	967,60	191,80	1035,40	239,05
	ELCT [s]	1145,80	552,00	768,20	117,81	900,00	380,51	938,00	398,28
Testphase	IRCT [s]	635,40	110,01	538,60	164,44	561,60	84,72	578,53	122,72

Um die Mittelwerte der unabhängigen Gruppen mit der einfaktoriellen Varianzanalyse (einfaktorielle Anova) einem statistischen Vergleich zu unterziehen, müssen die abhängigen Variablen innerhalb jeder Gruppe normalverteilt sein und das Kriterium der Varianzhomogenität erfüllen. Aus den Ergebnissen des Shapiro-Wilk-Tests konnte entnommen werden, dass bis auf BLCT ($p=0,002$, Gruppe 3) alle Messgrößen normalverteilt sind ($p>0,05$). Für diese wurde der Levene-Test durchgeführt. Demnach ist das Kriterium der Varianzhomogenität für die Variable ILCT nicht erfüllt ($p=0,035$). Im Gegensatz dazu erfüllen TLCT, ELCT und IRCT dieses Kriterium ($p>0,05$). Für diese wurde eine Anova durchgeführt, welche keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen lieferte ($p>0,05$). Die Messgrößen BLCT und ILCT wurden mit dem Kruskal-Wallis-Test überprüft, welcher ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen lieferte ($p>0,05$).

Neben den Zeiten wurden verschiedene Effektivitätsmessgrößen protokolliert und analysiert. Deren deskriptive Statistik wird in der nachfolgenden Tabelle 21 zusammengefasst.

Tabelle 21: Deskriptive Statistik der Effektivitätsmessgrößen– zweite formative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

Phasen	Messgrößen	Gruppe 1 -Büroangestellte-		Gruppe 2 -Montagearbeiter-		Gruppe 3 -AR Experten-		Gesamt	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Trainingsphase	AM	1,40	1,14	1,0	1,22	1,6	0,89	1,33	1,04
	CAM	0,80	0,83	0,80	0,83	0,60	0,54	0,73	0,70
	CBHA	0,20	0,44	0,40	0,54	0,40	0,54	0,33	0,48
	PM	0,40	0,54	2,20	2,48	1,20	2,68	1,26	2,12
	CPM	1,20	0,83	0,80	0,83	0,60	0,54	0,86	0,74
	CBHP	0,60	0,89	1,00	1,41	0,60	0,54	0,73	0,96
Testphase	SM	1,20	1,78	5,00	4,47	3,40	3,97	3,20	3,70
	CSM	0	0	0	0	0,20	0,44	0,67	0,25
	CBHS	0	0	0	0	0	0	0	0
	AM2	0	0	0	0	0,20	0,44	0,06	0,25
	CAM2	0	0	0	0	0	0	0	0
	CBHA2	0	0	0	0	0	0	0	0
	PM2	0	0	0	0	0	0	0	0
	CPM2	0,20	0,44	0	0	0,20	0,44	0,13	0,35
	CBHP2	0	0	0	0	0	0	0	0

Die Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests zeigten für keine der Effektivitätsmessgrößen eine Normalverteilung ($p < 0,05$). Demnach musste der Kruskal-Wallis-Test verwendet werden, um signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Gruppen festzustellen. Die Ergebnisse dieses Tests zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen für alle abhängigen Variablen ($p > 0,05$).

Zur Bewertung der Gesamt-Gebrauchstauglichkeit der HMD-basierten Trainingsanwendung wurde die SUS verwendet. Die nachfolgende Tabelle 22 fasst die deskriptive Statistik der SUS zusammen.

Tabelle 22: Deskriptive Statistik der SUS– zweite formative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

Messgröße	Gruppe 1 -Büroangestellte-		Gruppe 2 -Montagearbeiter-		Gruppe 3 -AR Experten-		Gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
SUS	92,00	2,73	90,50	7,37	89,00	4,18	90,50	4,92

Die Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests zeigten für die Messgröße SUS bei allen drei Gruppen eine Normalverteilung ($p > 0,05$). Darüber hinaus ist auch das Kriterium der Varianzhomogenität erfüllt, welches mit dem Levene-Test nachgewiesen wurde ($p = 0,135$). Demnach konnte eine einfaktorielle Anova verwendet

werden, welche für die Mittelwerte der unabhängigen Gruppen keine signifikanten Unterschiede lieferte ($p=0,663$). Neben diesem quantitativen Messwert wurde wie bereits bei der ersten formativen Evaluation (vgl. Abschnitt 5.3.5) die zusätzliche elfte Frage nach Bangor et al. [200] genutzt. Demnach bewerteten sechs Probanden das System mit dem Gesamturteil „Gut“ und neun Probanden mit „Exzellente“. Eine Einordnung der erzielten SUS der zweiten formativen Evaluation in die verschiedenen Bewertungsskalen wird in der nachfolgenden Abbildung 38 gezeigt. Demnach lässt sich das System mit einer SUS von 90,5 in der Adjektivskala zwischen exzellente und best möglich einordnen. Es ergibt sich eine Schulnote von 1, was dem Akzeptanzbereich akzeptabel entspricht. Im Vergleich zur ersten formativen Evaluation konnte die SUS um 8,4% gesteigert werden.

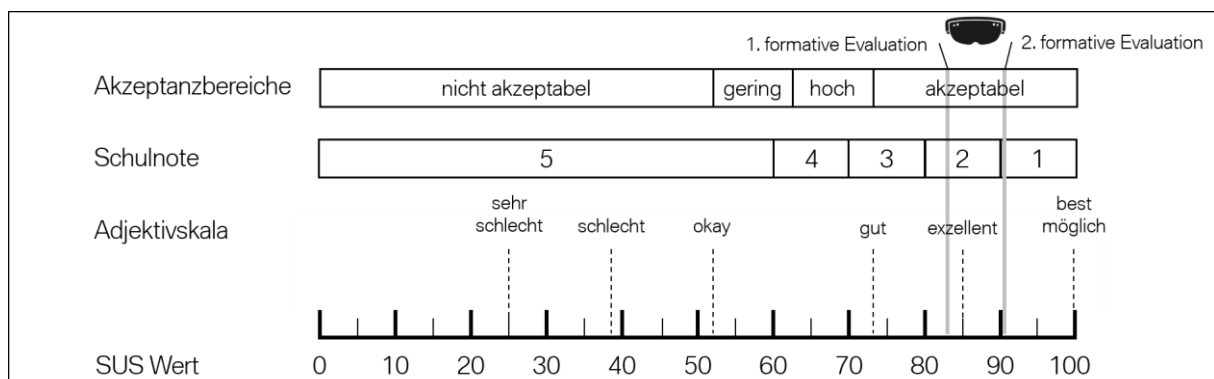


Abbildung 38: SUS- Zweite formative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

Neben der SUS wurde der AttrakDiff verwendet, um die pragmatische und hedonische Qualität des Systems zu beurteilen. Die Befragung der 15 Versuchsteilnehmer lieferte für PQ einen Mittelwert von 1,63 mit einer Konfidenz von 0,25 und für HQ einen Mittelwert von 1,40 mit einer Konfidenz von 0,38. Die mittleren Ausprägungen der Dimensionen PQ und HQ sind mit dem entsprechenden Konfidenzrechteck im Rahmen eines Ergebnisportfolios in der nachfolgenden Abbildung 39 grafisch dargestellt. Darüber hinaus verdeutlicht das Profil-der-Wortpaare die mittleren Ausprägungen der 28 gegensätzlichen Attribute des AttrakDiffs. Diese liefern Erkenntnisse bezüglich der PQ, der HQ-I, der HQ-S und der ATT des AR-basierten Trainingssystems. Besonders relevant sind die Extremwerte, welche gut und schlecht gelöste Eigenschaften des Systems grafisch veranschaulichen. Demnach ist das System einfach, praktisch und übersichtlich gestaltet. Weitere besonders positive Adjektive, welche das System beschreiben, sind: vorzeigbar, originell, kreativ, innovativ, neuartig, schön, gut und motivierend. Allerdings fühlen sich die Benutzer durch das System auch isoliert und von ihrer Umgebung getrennt.

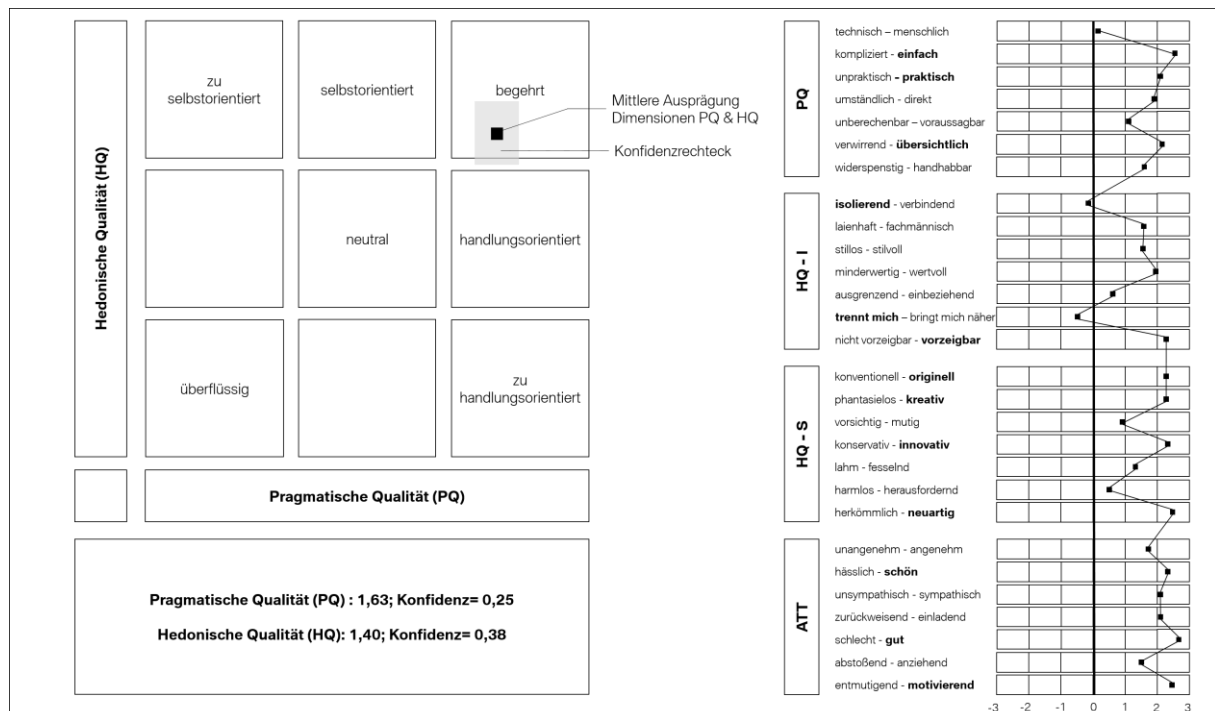


Abbildung 39: Ergebnis des AttrakDiffs- zweite formative Evaluation.

Quelle: in Anlehnung an die Ergebnisdarstellung von www.attrakdiff.de.

Zusätzlich zu den zwei bereits genannten Fragebögen wurde der NASA-TLX verwendet, um die subjektiv wahrgenommene Beanspruchung der Benutzer während des Trainings zu messen. Die nachfolgende Tabelle 23 gibt Auskunft über die deskriptive Statistik der sechs ermittelten Subskalen des Fragebogens.

Tabelle 23: Deskriptive Statistik des NASA-TLX- zweite formative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

	Gruppe 1 -Büroangestellte-		Gruppe 2 -Montagearbeiter-		Gruppe 3 -AR Experten-		Gesamt	
Messgrößen	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
MD	11,80	3,49	6,00	6,81	11,80	3,34	9,86	5,28
PD	6,60	3,78	4,60	5,50	6,80	4,81	6,00	4,51
TD	5,60	5,41	3,80	4,81	8,40	4,71	5,93	5,02
P	17,00	2,34	18,00	2,34	15,80	5,67	16,93	3,63
E	11,80	4,08	5,20	5,44	6,80	3,63	7,93	5,04
F	4,00	3,80	3,20	3,11	3,20	2,94	3,46	3,09

Die Messgrößen MD, PD und TD sind nach dem Shapiro-Wilk-Test zufolge nicht normalverteilt ($p < 0,05$). Für diese Messgrößen wurde der Kruskal-Wallis-Test verwendet, welcher keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Gruppen lieferte ($p > 0,05$). Im Gegensatz dazu sind die Messgrößen P, E und F normalverteilt und erfüllen dem Levene-Test nach das Kriterium der Varianzhomogenität ($p > 0,05$). Dementsprechend konnte eine einfaktorielle Anova verwendet werden, welche allerdings keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen lieferte ($p > 0,05$).

Ergänzend zu den verschiedenen zuvor genannten quantitativen Messgrößen, wurden qualitative Daten in Form von schriftlich dokumentierten Beobachtungen und Nutzeraussagen erfasst, um das Trainingssystem zu bewerten. Die Wesentlichen, die auf Systemschwachstellen hinweisen, werden nachfolgend aufgeführt:

- Die Benutzer gaben an, dass die Videoinstruktionen sehr hilfreich für die Montage sind. Allerdings fehlte ihnen eine Orientierungshilfe, um die Dauer des Videos einschätzen zu können. Darüber hinaus wünschen sie sich eine Pausenfunktion, um das Video zu stoppen, eine Tätigkeit auszuführen und sie im Anschluss fortzusetzen.
- Aus den Beobachtungen der Probanden ging hervor, dass in der Testphase vorwiegend Reihenfolgefehler (SM) auftraten (vgl. Tabelle 21). Auf Nachfrage des Evaluators äußerten die Probanden, dass die bereitgestellten Informationen durch die HMD-basierte Trainingssoftware sehr hilfreich für die erfolgreiche Tätigkeitsausführung waren. Allerdings hat die Software weniger dabei unterstützt, die Montagereihenfolge zu erlernen.
- Einige der Versuchsteilnehmer äußerten, dass die Ikonen 3D-Animation und 3D-Statisch (vgl. Abbildung 25) nicht selbsterklärend sind. Dies zeigte sich insbesondere zu Beginn der Evaluation (Einführung und Anfänger Level), da die Benutzer häufig die Funktionalität 3D-Animationen aktivierten in der Annahme, nähere Informationen zu den benötigten Schrauben zu erhalten.

5.4.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass für keine der erhobenen quantitativen Messgrößen signifikante Unterschiede zwischen den drei Gruppen vorliegen. Dies lässt sich auf die geringe Anzahl der Probanden je Gruppe zurückführen. Demnach sollte diese bei zukünftigen Evaluationen erhöht werden, um signifikante Mittelwertunterschiede zu identifizieren. Allerdings zeigen die Resultate auch, dass verschiedene Benutzer mit unterschiedlichen Erfahrungen im Kontext der manuellen Montage und der Erprobung AR-basierter Assistenzsysteme die HMD-basierte Trainingsanwendung gleichermaßen nutzen können. Ersichtlich wird das beispielsweise anhand der deskriptiven Statistik der Effizienzmessgrößen (vgl. Tabelle 20). Demnach zeigt sich ein deutlicher Trainingseffekt bei allen Teilnehmern, welcher durch die Reduzierung der Absolvierungsdauer der einzelnen Montagedurchgänge deutlich wird. Zwischen dem ersten und zweiten Montagedurchgang reduziert sich die Absolvierungsdauer bereits um 50,71%, zwischen dem zweiten und dritten Montagedurchgang um 23,46% und zwischen dem dritten und vierten Montagedurchgang um 9,40%. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Probanden die letzte Montage des Motors (Testphase), welche ohne das HMD ausgeführt wurde, 38,32% schneller absolvierten als den vierten Montagedurchgang (Experte-Level). Auf Basis dieser Ergebnisse lässt sich festhalten, dass die Probanden sensomotorische Fähigkeiten über die einzelnen Montagedurchgänge hinweg erwerben. Somit führt die funktionelle Synchronisation der Arme, Hände und Finger, welche auch als bimanuelle Koordination bezeichnet wird, dazu, dass dem Benutzer die Bedienung des HMDs und die Ausführung der Montageschritte mit zunehmender Versuchsdauer leichter fallen [219]. Dadurch wird die Zeit zur Absolvierung der Montage sukzessive reduziert. Diese Erkenntnis deckt sich zugleich mit dem im Abschnitt 3.3.2 dargelegten Modell zum Erlernen motorischer Fähigkeiten von Fitts und Posner [98].

Bei den Ergebnissen der Effektivitätsmessgrößen (vgl. Tabelle 21) zeigt sich, dass die Probanden während der vier Trainingsphasen sehr wenig Fehler machten. Das lässt darauf schließen, dass die Informationsbereitstellung in den einzelnen Level ausreichend ist, um die Montageschritte erfolgreich zu absolvieren. Allerdings zeigen die hohen Standardabweichungen, dass die einzelnen Daten der erhobenen Messgrößen stark um die berechneten Mittelwerte streuen. Diese schiefen, nicht-normalverteilten Messreihen kommen zustande, da einige Probanden keine Fehler während der Montage und andere wiederum bis zu sieben Fehler machten. Hier lässt sich allerdings kein systematischer Zusammenhang zwischen den Erfahrungen, dem Alter oder dem Geschlecht der Versuchsteilnehmer herstellen. Demnach ist die hohe Standardabweichung auf den geringen Stichprobenumfang zurückzuführen. Wie bereits zu Beginn dieser Diskussion angeführt, sollte die Anzahl der Probanden je Gruppe für zukünftige statistische Vergleiche erhöht werden.

Die Ergebnisse der Testphase zeigen (vgl. Tabelle 21), dass die Probanden in der Lage waren, die erlernten Montageschritte nahezu ohne Montage- und Entnahmefehler auszuführen. Das verdeutlicht die Effektivität der HMD-basierten Trainingsanwendung. Allerdings zeigt die deskriptive Statistik der Effektivitätsmessgrößen auch, dass Reihenfolgefehler vorliegen ($M = 3,20$; $SD = 3,70$). Demnach wurden die prozeduralen Fähigkeiten einiger Probanden über die vier Trainingsphasen hinweg unzureichend ausgebildet. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die siebte Empfehlung für AR-basierte Trainingssysteme (vgl. Abbildung 14), welche aus der strukturierten Literaturrecherche hervorgeht, bei der Gestaltung der Trainingsanwendung mangelhaft berücksichtigt wurde. Demnach bedarf es einer Optimierung der HMD-basierten Trainingssoftware, welche praktische und geistige Lernphasen berücksichtigt. Hierfür wird die Software um ein weiteres Trainingslevel erweitert. Dieses ist wie ein interaktives, spielerisches Quiz aufgebaut und ermöglicht dem Benutzer die virtuelle Montage des Motors. Um das Quiz zu lösen, muss der Benutzer die notwendigen Bauteile in der korrekten Reihenfolge auswählen. Die Bauteile befinden sich als virtuelle 3D-Objekte über den zugehörigen Boxen im Regal. Die korrekte Position aller virtuellen Objekte wird mittels dem im Abschnitt 5.2.6 beschriebenen Extended Natural-Feature Tracking realisiert. Über die Lautsprecher der Microsoft HoloLens erhält der Benutzer eine akustische Aufforderung, das korrekte Bauteil für den jeweiligen Montageschritt zu selektieren. Die Selektion erfolgt dabei mit den Interaktionsmodalitäten, welche im Abschnitt 5.2.4 beschrieben wurden. Bei korrekter Auswahl erhält der Benutzer ein positives multimodales Feedback. Zunächst verfärbt sich das Objekt grün und über die Lautsprecher des HMDs wird ein Signalton ausgegeben. Zusätzlich dazu erfolgen verschiedene Animationen. Zum einen wird der virtuelle 3D-Charakter, welcher sich zum Zeitpunkt des Quiz-Levels am Regal befindet, animiert. Er dreht sich, schwingt seine virtuellen Arme bzw. Hände über seinen Kopf und vermittelt dem Benutzer durch die zusätzliche Ausgabe eines Sprachfeedbacks („Gut gemacht“) eine positive Rückmeldung. Neben dem virtuellen 3D-Charakter wird das selektierte Bauteil animiert. Es verändert seine Position im realen Raum und „schwebt“ vom Regal an die korrekte Montageposition am Motor. Dort wird es ortsfest positioniert bis das Quiz Level erfolgreich abgeschlossen oder ein falsches Bauteil vom Benutzer ausgewählt wurde. Die Selektion eines falschen Objekts führt dazu, dass sich dieses rot verfärbt, ein Fehlersignal ausgegeben wird und das Level erneut gestartet wird. Dabei werden die Positionen aller Bauteile in ihren ursprünglichen Ausgangszustand zurück versetzt. Um den Aufbau eines mentalen Modells zu stärken (vgl. Abbil-

dung 14, Empfehlung 2), werden zusätzliche Strukturinformationen implementiert. Eine Gesamtprozessübersicht wird im direkten Sichtfeld des Benutzers positioniert. Bei korrekter Auswahl werden fehlende Informationen (Bezeichnung der Teile) in der Übersicht ergänzt, wodurch der Benutzer unterstützt wird, die Montagereihenfolge zu lernen. Zusätzlich dazu bleibt der Fortschrittsbalken, der bereits Bestandteil der Bedienoberfläche ist (vgl. Abbildung 25), bestehen. Somit erhält ein Benutzer zu jederzeit Informationen zum aktuellen Prozessfortschritt, unabhängig, ob sein Blick auf das Regal oder den Motor gerichtet ist. Die nachfolgende Abbildung 40 verdeutlicht die beschriebenen Inhalte des zusätzlichen Levels aus Sicht eines Benutzers. Neben der Sicht auf das Regal, welche sich auf den ersten Montageschritt bezieht, wird im rechten oberen Bereich der Abbildung die Sicht auf den Motor deutlich. Diese bezieht sich auf den siebten Montageschritt. Es ist ersichtlich, dass die zuvor ausgewählten Bauteile bereits virtuell am Motor verbaut sind.

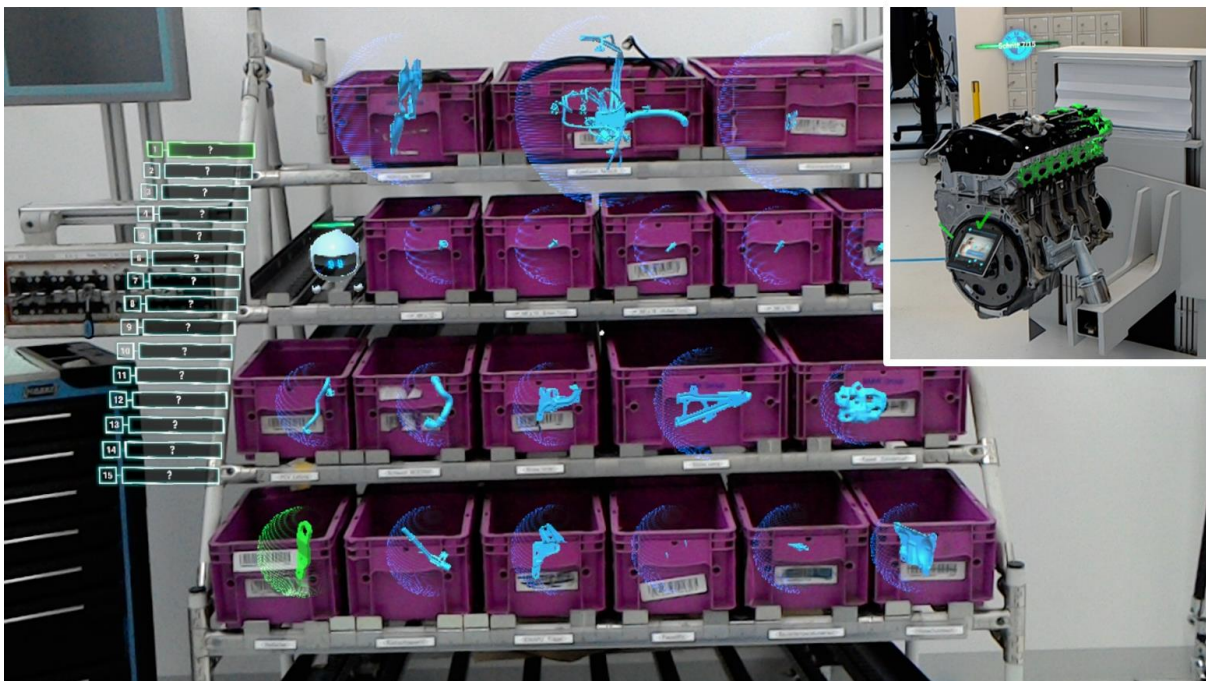


Abbildung 40: Sicht eines Benutzers während der Absolvierung des zusätzlichen Levels.

Quelle: eigene Darstellung.

Bei dem Ergebnis der SUS konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen festgestellt werden. Es zeigt sich, dass alle drei Gruppen eine hohe SUS vergeben haben und die HMD-basierte Trainingsanwendung bereits als gebrauchstauglich empfunden wird. Im Vergleich zur ersten formativen Evaluation konnte die Gesamt-SUS um 9,4% auf einen Wert von 90,5 gesteigert werden, was auf die Optimierung und Vervollständigung der Software nach der ersten formativen Evaluation zurückzuführen ist. Dieses Ergebnis deckt sich mit dem des AttrakDiffs. Demnach adressiert das System sowohl pragmatische als auch hedonische Aspekte. Besonders deutlich wird das an den vielen positiven Adjektiven, die das System näher beschrieben (vgl. Abbildung 39). Darüber hinaus konnten die PQ und die HQ der Trainingsanwendung im Vergleich zur ersten formativen Evaluation gesteigert werden. Dabei hat sich das Konfidenzrechteck verkleinert, was zu einer Steigerung der Wahrscheinlichkeit führt, dass Benutzer das System als „begeehrt“ einstufen.

Die Ergebnisanalyse der sechs Subskalen des NASA-TLX lieferte keine signifikanten Mittelwertunterschiede zwischen den Gruppen. Allerdings zeigt sich, dass die mentale Beanspruchung (MD) aller 15 Versuchsteilnehmer am höchsten war. Dieses Ergebnis lässt sich darauf zurückführen, dass die Probanden während der Absolvierung der Trainings- und Testphase(n) selbstständig denken, entscheiden, erinnern, hinsehen und suchen mussten. Dadurch steigt die geistige Anstrengung. Allerdings zeigt es auch, dass das System kein reines Leitsystem ist, welches einen Benutzer Schritt-für-Schritt durch den Montageprozess führt, sondern sich vielmehr auf das Training eines Benutzers konzentriert. Die Gesamtbelastung, welche über den ungewichteten NASA-TLX (engl. Raw NASA-TLX – [RTLX]) ermittelt wird und sich durch die Summierung der Messgrößen MD, PD, TD, E und F ergibt, liegt mit einem Wert von 33,18 unter dem Durchschnittswert. Dieser wurde von Grier [220] im Rahmen einer Literaturrecherche auf Basis von 237 wissenschaftlichen Publikationen ermittelt und beträgt für den RTLX 45,29 (SD= 14,99).

Ergänzend zu den quantitativen Daten geben die qualitativen Aussagen und Beobachtungen der Benutzer Hinweise auf weitere mögliche Optimierungspotentiale der Trainingssoftware. Demnach werden die Ikonen der Bedienoberfläche angepasst und generischer gestaltet, sodass die Trainingssoftware selbsterklärender ist und auch auf andere Anwendungsfälle übertragen werden kann (z.B. Montage eines Hochvoltspeichers). Anstelle des Schrauben- und Motorsymbols werden zwei Würfel verwendet, die dem Benutzer verdeutlichen sollen, dass bei deren Aktivierung die relevanten virtuellen 3D-Objekte visualisiert werden. Dabei wird ein Würfel als Voll- und ein anderer als Hohlkörper dargestellt. Bei der Aktivierung der Vollkörper-Ikone wird das virtuelle Bauteil statisch an der korrekten Montageposition visualisiert. Im Gegensatz dazu bewirkt die Aktivierung der Hohlkörper-Ikone die Montageanimation des Bauteils als Drahtgittermodell an der korrekten Position am Motor im realen Raum. Neben der Bedienoberfläche wird die Video-Funktionalität erneut angepasst. Ein Fortschrittsbalken wird hinzugefügt, um dem Benutzer die Dauer des Videos zu verdeutlichen und den Aufbau des mentalen Modells zu stärken. Zusätzlich ermöglichen eine Play/Pause- sowie eine Neustart-Taste, dass ein Benutzer das Video individuell steuern kann. Die Optimierungen an der Trainingssoftware sind in der nachfolgenden Abbildung 41 dargestellt.

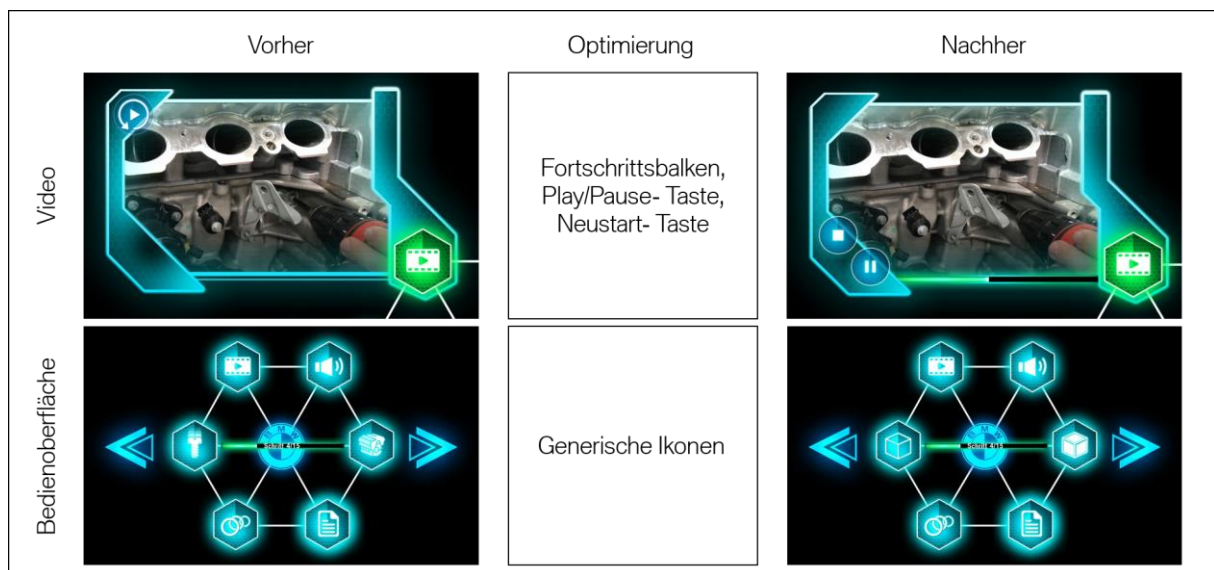


Abbildung 41: Optimierung der virtuellen Bedienoberfläche nach der zweiten formativen Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

5.4.6 Zusammenfassung der zweiten formativen Evaluation

In dieser zweiten formativen Evaluation wurde die optimierte und ausprogrammierte HMD-basierte Trainingsanwendung von fünf Büroangestellten, fünf Montagearbeitern und fünf AR-Experten erprobt. Die Erprobung erfolgte dabei am Beispiel eines realen industriellen Anwendungsfalls (vgl. Abschnitt 5.3.1). Hierzu absolvierten alle Probanden zunächst die verschiedenen Trainingslevel der Software (vgl. Abbildung 26). Im Anschluss an das Training wiederholten die Versuchsteilnehmer die erlernte Montageprozedur ohne die Unterstützung des Assistenzsystems. Während dieser Trainings- und Testphase(n) wurden verschiedene quantitative Messdaten erhoben, um die Effektivität und Effizienz des Systems zu beurteilen. Die statistische Auswertung der Daten lieferte allerdings keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Gruppen, was sich auf die geringe Stichprobengröße zurückführen lässt. Allerdings zeigen die Ergebnisse auch, dass alle Probanden in der Lage waren, die 15 Montageschritte mit Hilfe der HMD-basierten Software erfolgreich zu absolvieren. Darüber hinaus konnte ein deutlicher Trainingseffekt nachgewiesen werden, der zum einen durch die Reduktion der Absolvierungsdauer je Montagedurchgang und zum anderen durch die geringe Anzahl der Montage- und Entnahmefehler in der Testphase ersichtlich wird. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Fähigkeitserwerb der Benutzer durch das System unterstützt wurde. Neben den quantitativen Messgrößen wurden standardisierte Fragebögen genutzt, um die pragmatisch/ergonomischen und hedonischen Qualitätsaspekte der Trainingsanwendung zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass die subjektiv wahrgenommene Beanspruchung der Benutzer durch das System unterdurchschnittlich hoch ist und die pragmatischen als auch hedonischen Qualitätsaspekte im Vergleich zur ersten formativen Evaluation gesteigert werden konnten. Aus den Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass die Trainingsanwendung verschiedene Benutzer mit unterschiedlichen Kenntnissen im Bereich HMD-basierter Anwendung und manueller Montageprozesse, effektiv, effizient und zufriedenstellend beim Erlernen manueller Montageprozeduren unterstützen kann. Allerdings zeigen die qualitativen Beobachtungen und Aussagen der Benutzer auch, dass noch Optimierungsbedarf besteht. Daraufhin wurden die Software angepasst und alle Änderungen ausreichend detailliert beschrieben. Um die Wirksamkeit der Optimierungen zu überprüfen, muss eine erneute Evaluation durchgeführt werden.

5.5 Dritte Formative Evaluation

Die dritte formative Evaluation dient zur Überprüfung der Nützlichkeit der erneut optimierten HMD-basierten Trainingsanwendung, welche den Benutzer beim Erlernen manueller Montagetätigkeiten unterstützen soll. Hierzu wird, wie bereits bei den zuvor beschriebenen formativen Evaluationen, der im Abschnitt 5.3.1 beschriebene AP und eine beispielhafte Arbeitsaufgabe, bestehend aus 15 aufeinanderfolgenden Montageschritten (vgl. Abschnitt 5.1.6), verwendet. In den nachfolgenden Unterabschnitten werden das Versuchsdesign, die Versuchsteilnehmer und der Versuchsablauf näher erläutert. Abschließend werden die Ergebnisse dieses Experiments zusammenfassend aufgezeigt und diskutiert, wodurch weitere wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen werden. Die Ergebnisse dieses Experiments sind bereits teilweise in dem wissenschaftlichen Konferenzbeitrag von Werrlich et al. [221] veröffentlicht.

5.5.1 Versuchsdesign

Bei diesem Experiment soll primär erforscht werden, wie sich die erweiterte HMD-basierte Trainingsanwendung mit dem zusätzlichen Level (vgl. Abbildung 40) auf den Wissenstransfer eines Benutzers auswirkt. Hierzu wird ein between-subject Versuchsdesign mit zwei Gruppen verwendet. Als unabhängige Variable wird die Art des Trainings definiert. Demnach absolvieren beide Gruppen zunächst alle vier Level der Trainingssoftware. Im Gegensatz zur ersten Gruppe werden die Probanden der zweiten Gruppe gebeten, das zusätzliche Level als Ergänzung zu absolvieren. Im Anschluss an das Training werden beide Gruppen aufgefordert, die erlernte Montageprozedur ohne jegliche Unterstützung zu wiederholen. Dabei werden die nachfolgend beschriebenen, abhängigen quantitativen Messgrößen erhoben, die umfangreiche Erkenntnisse über den Einfluss des zusätzlichen Levels auf den Wissenstransfer liefern.

Während die Probanden die verschiedenen Level absolvieren, werden folgende abhängigen Variablen zur Bewertung der Effektivität des Systems erhoben (vgl. Abschnitt 5.4.1): Montagefehler (AM), selbst-korrigierte Montagefehler (CAM), korrigierte Montagefehler durch Hilfe (CBHA), Entnahmefehler (PM), selbst-korrigierte Entnahmefehler (CPM) und durch Hilfe korrigierte Entnahmefehler (CBHP). Um die Effizienz des Trainingssystems zu beurteilen, wird die Zeit zur Bewältigung des Einführung-Levels (TLCT), des Anfänger-Levels (BLCT), des Fortgeschritten-Levels (ILCT) und des Experte-Levels (ELCT) gemessen. Zusätzlich dazu wird bei der zweiten Gruppe die Zeit zur Absolvierung des zusätzlichen Levels gemessen (QLCT). Aus der Summe aller Einzelzeiten ergibt sich die Gesamtzeit des Trainings (TTCT).

Nachdem die Trainingsphase beendet ist und alle Level absolviert wurden, erfolgt ein Test zur Überprüfung des Wissenstransfers. Dabei werden die Probanden gebeten, die erlernte Montagesequenz ohne Unterstützung der HMD-basierten Trainingsanwendung zu wiederholen. Während dieses Tests werden erneut Montagefehler (AM2), selbst-korrigierte Montagefehler (CAM2), durch Hilfe korrigierte Montagefehler (CBHA2), Entnahmefehler (PM2), selbst-korrigierte Entnahmefehler (CPM2), durch Hilfe korrigierte Entnahmefehler (CBHP2) und zusätzlich Reihenfolgefehler (SM), selbst-korrigierte Reihenfolgefehler (CSM), durch Hilfe korrigierte Reihenfolgefehler (CBHS) sowie die Zeit zur Bewältigung der Montagesequenz gemessen (IRCT). Die Ergebnisse dieser quantitativen abhängigen Variablen liefern schließlich Rückschlüsse auf die Nützlichkeit des zusätzlichen Levels.

Zu den bereits genannten abhängigen Variablen werden die SUS zur Bewertung der Gesamt-Gebrauchstauglichkeit des Systems und der NASA-TLX zur Messung der subjektiv wahrgenommenen Beanspruchung der Probanden während des Versuchs verwendet. Dabei werden die mentale Beanspruchung (MD), die physische Beanspruchung (PD), die zeitliche Beanspruchung (TD), die Leistung (P), die Anstrengung (E) und die Frustration (F) der Benutzer erfragt. Ergänzend zu den bereits genannten quantitativen abhängigen Daten, werden qualitative Daten in Form von Nutzeraussagen schriftlich dokumentiert. Mit Hilfe dieses Methodenmix ergeben sich umfassende Erkenntnisse hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit des Trainingssystems, wodurch eine optimale Systemneugestaltung möglich wird.

5.5.2 Versuchsteilnehmer

An der dritten formativen Evaluation nehmen 30 Probanden teil (25 männlich, 5 weiblich). Das Alter der Probanden schwankt zwischen 16 und 42 Jahren ($M = 24,36$; $SD = 7,35$). Die Probanden werden auf zwei gleich große Gruppen zu je 15 Versuchsteilnehmern aufgeteilt. Beide Gruppen haben wenig Erfahrung im Umgang mit AR-basierten Systemen ($M = 0,96$; $SD = 1,52$), aber erweiterte Kenntnisse im Bereich der manuellen Montage ($M = 2,30$; $SD = 1,12$). Wie auch in den Experimenten zuvor, beherrschen alle Probanden die deutsche Sprache, um alle Instruktionen, welche durch die Trainingsanwendung bereitgestellt werden, zu verstehen.

5.5.3 Versuchsablauf

Vor Beginn des Experiments werden 30 Versuchsteilnehmer akquiriert, die zuvor nicht an dem Versuch teilgenommen haben und keine Erfahrung mit der Montage des ausgewählten Motors aufweisen. Alle Probanden werden vor dem Versuch darüber informiert, dass die Versuchsdauer auf drei Stunden festgelegt ist und für den Versuch entsprechende Arbeitskleidung und Sicherheitsschuhe mitzubringen sind.

Zu Beginn des Versuchs begrüßt einer der zwei Evaluatoren den Probanden und erläutert den Versuch und die Versuchsumgebung. Darüber hinaus wird der Person klar gemacht, dass der Versuch jederzeit abgebrochen werden kann, wenn diese sich unwohl fühlt. Nach der kurzen Einführung wird die IPD gemessen und die Microsoft HoloLens daraufhin individuell eingestellt. Dadurch wird die korrekte räumliche Darstellung der virtuellen Informationen gewährleistet. Im Anschluss daran unterstützt einer der Evaluatoren den Benutzer dabei, die Microsoft HoloLens mit Hilfe des Kopfbügels (vgl. Abbildung 18) auf dessen Kopf zu positionieren, um einen hohen Tragekomfort während des Versuchs sicherzustellen. Danach erhält der Proband eine kurze Einweisung in die Interaktionsmodalitäten des HMDs (vgl. Abbildung 29). Hierzu wird die Software Learn Gesture verwendet, welche standardmäßig auf dem Anzeigegerät installiert ist. Nachdem die Vorbereitungen abgeschlossen sind, startet der eigentliche Versuch. Dieser gliedert sich in eine Trainingsphase und eine Testphase. In der Trainingsphase absolvieren die Probanden beider Gruppen die verschiedenen Level (vgl. Abbildung 26) der Trainingssoftware, wobei der Motor viermal montiert wird. Ergänzend dazu werden die Teilnehmer der zweiten Gruppe aufgefordert, das zusätzliche Level zu absolvieren. Während der Absolvierung der einzelnen Trainingsphasen erheben zwei Evaluatoren verschiedene quantitative Messdaten hinsichtlich der Effektivität und Effizienz des Trainingssystems (vgl. Abschnitt 5.5.1). Zwischen jedem Level erfolgt eine zehnminütige Pause. In dieser Zeit wird der Motor demontiert und die Versuchsumgebung in ihren Ausgangszustand zurück versetzt. Die Benutzer können sich währenddessen ausruhen und an dem Buffet bedienen, welches als Vergütung für die Versuchsteilnahme zur Verfügung gestellt wird. Nach Beendigung der Trainingsphase folgt eine Testphase. In dieser müssen die Probanden den Motor ohne die unterstützenden Informationen der HMD-basierten Anwendung montieren. Dabei werden die im Abschnitt 5.5.1 beschriebenen quantitativen Daten erhoben. Der Vergleich beider Gruppen liefert schließlich wichtige Erkenntnisse über die Nützlichkeit der Trainingsanwendungen.

Nachdem die Testphase beendet ist, wird der Proband gebeten, zwei Fragebögen (SUS & NASA-TLX) handschriftlich auszufüllen. Die verschiedenen Daten werden von den Evaluatoren im Anschluss an den Versuch ausgewertet. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse liefert der nachfolgende Abschnitt.

5.5.4 Ergebnisse

Mit der Software IBM SPSS Statistics wurden zunächst die Zeiten analysiert, welche die Versuchsteilnehmer zur Absolvierung der einzelnen Trainingsphasen und der Testphase benötigten. Die nachfolgende Tabelle 24 gibt Aufschluss über die deskriptive Statistik der erhobenen Effizienzmessgrößen.

Tabelle 24: Deskriptive Statistik der Effizienzmessgrößen– dritte formative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

Phasen	Messgrößen	Gruppe 1 -ohne Zusatzlevel-		Gruppe 2 -mit Zusatzlevel-		Gesamt	
		M	SD	M	SD	M	SD
Trainingsphase	TLCT [s]	2745,20	500,97	2747,33	517,03	2746,26	491,80
	BLCT [s]	1352,86	373,74	1407,86	348,07	1380,36	349,97
	ILCT [s]	1035,40	239,05	1227,06	453,72	1131,233	363,21
	ELCT [s]	938,00	398,28	973,53	202,19	955,76	305,64
	QLCT [s]	-	-	806,00	736,92	150,00	149,99
	TTCT [s]	6071,46	1117,66	7161,80	1292,92	6616,63	1288,51
Testphase	IRCT [s]	578,53	122,72	702,46	144,96	640,50	143,78

Aus dem Shapiro-Wilk-Test ging hervor, dass lediglich die Daten der Messgrößen TLCT, TTCT und IRCT normalverteilt sind ($p > 0,05$). Für diese wurde mit Hilfe des Levene-Tests das Kriterium der Varianzhomogenität überprüft. Alle drei Messgrößen erfüllten dieses ($p > 0,05$), sodass ein t-Test für die unabhängigen Stichproben durchgeführt werden konnte. Demnach unterscheiden sich die Mittelwerte der beiden Gruppen für die Messgrößen TTCT ($t(28) = -2,471$, $p = 0,02$) mit einer mittleren Effektstärke ($r = 0,42$) und IRCT ($t(28) = -2,527$, $p = 0,017$) mit einer mittleren Effektstärke ($r = 0,43$) signifikant. Die erste Gruppe absolvierte das gesamte Training 15,23% und die Testphase 21,4% schneller als die zweite Gruppe. Für die Messgröße TLCT konnte mit Hilfe des t-Tests kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen ermittelt werden ($p = 0,991$). Die Mittelwerte der Messgrößen BLCT, ILCT und ELCT wurden mit dem Mann-Whitney-U-Test untersucht, da für diese keine Normalverteilung vorlag. Allerdings konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen ermittelt werden ($p > 0,05$).

Neben den Effizienzmessgrößen wurden die im Abschnitt 5.5.1 beschriebenen Effektivitätsmessgrößen innerhalb der Trainings- und Testphase erhoben. Diese wurden analysiert und in der nachfolgenden Tabelle 25 zusammengefasst.

Tabelle 25: Deskriptive Statistik der Effektivitätsmessgrößen– dritte formative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

Phasen	Messgrößen	Gruppe 1 -ohne Zusatzlevel-		Gruppe 2 -mit Zusatzlevel-		Gesamt	
		M	SD	M	SD	M	SD
Trainingsphase	AM	1,33	1,04	1,60	1,12	1,46	1,05
	CAM	0,73	0,70	0,40	0,73	0,56	0,71
	CBHA	0,33	0,48	0,13	0,35	0,23	0,42
	PM	1,26	2,12	0,66	1,29	0,96	1,72
	CPM	0,86	0,74	0,53	0,91	0,70	0,82
	CBHP	0,73	0,96	0,46	0,83	0,60	0,87
Testphase	SM	3,20	3,70	0,66	0,97	1,93	0,26
	CSM	0,67	0,25	0,46	0,83	0,26	0,62
	CBHS	0	0	0	0	0	0
	AM2	0,06	0,25	0,06	0,25	0,06	0,25
	CAM2	0	0	0	0	0	0
	CBHA2	0	0	0	0	0	0
	PM2	0	0	0	0	0	0
	CPM2	0,13	0,35	0,06	0,25	0,10	0,03
	CBHP2	0	0	0	0	0	0

Dem Shapiro-Wilk-Test zufolge lagen für keine der Messgrößen innerhalb der beiden Gruppen eine Normalverteilung vor ($p < 0,05$). Demzufolge wurde der Mann-Whitney-U Test für den statistischen Vergleich der Mittelwerte verwendet. Dieser lieferte lediglich für die Messgröße SM einen signifikanten Mittelwertunterschied zwischen den Gruppen ($U = 67,50$; $p = 0,04$) mit einer Effektstärke (r) von 0,37, was einem mittlerem Effekt entspricht. Für alle anderen Messgrößen wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen festgestellt ($p > 0,05$).

Wie bereits in den zuvor beschriebenen Evaluationen wurde auch in der dritten formativen Evaluation die SUS zur Bewertung der Gesamt-Gebrauchstauglichkeit der HMD-basierten Trainingsanwendung verwendet. In der nachfolgenden Tabelle 26 ist die deskriptive Statistik der SUS zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 26: Deskriptive Statistik der SUS– dritte formative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

Messgröße	Gruppe 1 -ohne Zusatzlevel-		Gruppe 2 -mit Zusatzlevel-		Gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD
SUS	90,50	4,92	91,83	6,77	91,16	5,76

Dem Shapiro-Wilk-Test zufolge waren die Daten dieser Messgröße in beiden Gruppen normalverteilt ($p > 0,05$) und das Kriterium der Varianzgleichheit war nach dem Levene-Test erfüllt ($p > 0,05$). Somit konnte

ein statistischer Mittelwertvergleich mit dem t-Test durchgeführt werden. Das Ergebnis der statistischen Auswertung zeigte, dass kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen vorlag ($p=0,543$). Zusätzlich zu diesem quantitativen Messwert, welcher sich aus den Antworten der zehn Fragen des SUS-Fragebogens ergibt, wurde, wie bereits in den formativen Evaluationen zuvor, die zusätzliche elfte Frage nach Bangor et al. [200] verwendet. Demnach bewerteten zehn Probanden das System mit dem Gesamturteil „Gut“ und zwanzig Probanden mit „Exzellente“. Die Gesamt-SUS mit einem Wert von 91,16 wird in der nachfolgenden Abbildung 42 in die verschiedenen Bewertungsskalen eingeordnet. Dieser Wert kann auf der Adjektivskala zwischen exzellente und best möglich eingeordnet werden. Dies entspricht der bestmöglichen Schulnote 1 und dem Akzeptanzbereich akzeptabel. Im Vergleich zur ersten formativen Evaluation konnte der Wert um 9,17% und im Vergleich zur zweiten formativen Evaluation um 0,7% gesteigert werden.

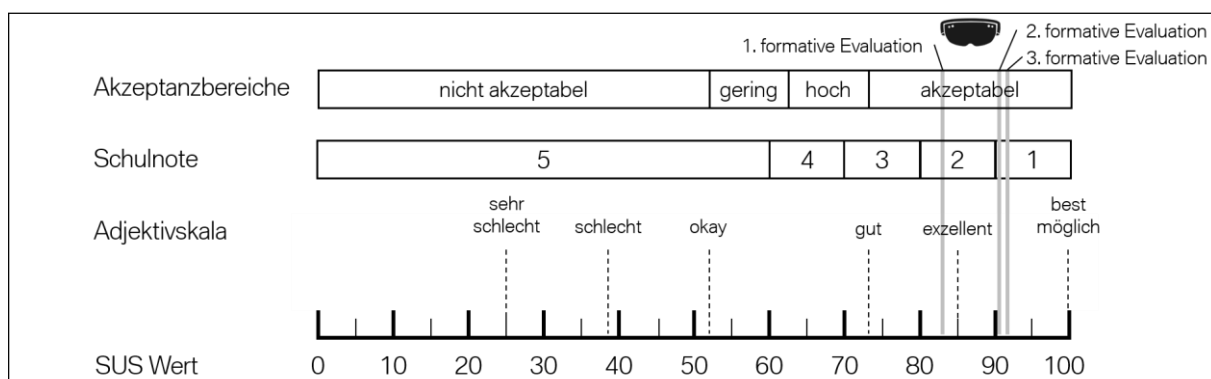


Abbildung 42: SUS- dritte formative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

Zusätzlich zur SUS wurde der NASA-TLX verwendet, um die subjektiv wahrgenommene Beanspruchung der Benutzer während des Trainings zu ermitteln. In der nachfolgenden Tabelle 27 ist die deskriptive Gruppenstatistik der sechs erfassten Subskalen aufgezeigt.

Tabelle 27: Deskriptive Statistik des NASA-TLX- dritte formative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

	Gruppe 1 -ohne Zusatzlevel-		Gruppe 2 -mit Zusatzlevel-		Gesamt	
Messgrößen	M	SD	M	SD	M	SD
MD	9,86	5,28	7,86	4,50	8,86	4,84
PD	6,00	4,51	5,53	3,88	5,76	4,07
TD	5,93	5,02	3,40	2,87	4,66	4,14
P	16,93	3,63	17,33	3,97	17,13	3,68
E	7,93	5,04	8,53	5,91	8,23	5,32
F	3,46	3,09	3,80	3,91	3,63	3,41

Keine der sechs Messgrößen ist laut dem Shapiro-Wilk-Test normalverteilt ($p<0,05$). Demnach wurde der Mann-Whitney-U-Test verwendet, welcher keine signifikanten Mittelwertunterschiede zwischen den unabhängigen Gruppen lieferte ($p>0,05$).

5.5.5 Diskussion der Ergebnisse

Aus der statistischen Analyse der Effizienzmessgrößen ging hervor, dass die erste Gruppe das gesamte Training (TTCT) signifikant schneller absolvierte als die zweite Gruppe. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die zweite Gruppe im Gegensatz zur ersten Gruppe das zusätzliche Level der Trainingssoftware ($M=806,00s$; $SD=736,92s$) absolvierte. Bei der Absolvierungsdauer der einzelnen Trainingslevel konnten allerdings keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden. Beide Gruppen zeigen einen deutlichen Trainingseffekt, welcher anhand der Reduktion der Absolvierungsdauer der einzelnen Montagedurchgänge ersichtlich wird (vgl. Tabelle 24). Demnach reduzierte sich die Absolvierungsdauer beider Gruppen zwischen dem ersten und zweiten Montagedurchgang um 49,73%, zwischen dem zweiten und dritten Montagedurchgang um weitere 18,04% und zwischen dem dritten und vierten Montagedurchgang um 15,51%. Die abschließende Testphase (IRCT) absolvierte die erste Gruppe 17,64% schneller als die zweite Gruppe. Der t-Test für unabhängige Stichproben lieferte für die Messgröße ILCT einen signifikanten Mittelwertunterschied zwischen den Gruppen. Um diesen Effekt zu verstehen, muss die Montagereihenfolge während der Testphase berücksichtigt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die zweite Gruppe, welche das zusätzliche Level absolvierte, 79,37% weniger Reihenfolgefehler (SM) machte als die erste Gruppe. Demnach erhöht sich die Absolvierungsdauer signifikant, wenn Versuchsteilnehmer die Montage in korrekter Reihenfolge ausführen. Daraus resultieren zwei mögliche Schlussfolgerungen:

- Die vorgegebene Montagesequenz ist aufgrund häufiger Werkzeugwechsel, langer Laufwege und ständig wechselnden Montagepositionen ineffizient. Die Probanden haben über die verschiedenen Montagedurchgänge hinweg eine effizientere Montagereihenfolge gefunden. Dadurch sind sie von der vorgegeben Reihenfolge abgewichen.
- Durch die optimierte HMD-basierte Trainingsanwendung (mit zusätzlichem Level) werden aktive und passive Lernphasen berücksichtigt, wodurch die sensomotorischen und kognitiven Fähigkeiten der Benutzer optimal trainiert werden. Daher absolvierten die Probanden der zweiten Gruppe die Testphase nahezu ohne Reihenfolgefehler ($M=0,66$; $SD=0,97$).

Hinsichtlich der erhobenen Montage- und Entnahmefehler zeigten die Gruppen weder in den Trainingsphasen noch in der Testphase signifikante Unterschiede. Diese Fehler traten in beiden Gruppen vereinzelt auf und sind entsprechend der deskriptiven Statistik (vgl. Tabelle 25) vernachlässigbar gering. Folglich wird klar, dass die bereitgestellten multimodalen Informationen des Assistenzsystems die Benutzer während der einzelnen Trainingsphasen optimal unterstützen. Darüber hinaus vermittelt die Trainingssoftware das notwendige Wissen, welches die Probanden benötigen, um in der Testphase die korrekten Teile zu entnehmen und diese schließlich an die entsprechende Verbauposition am Motor zu montieren.

Der t-Test lieferte für die SUS keinen signifikanten Mittelwertunterschied zwischen beiden Gruppen ($p>0,05$). Der hohe Gesamtwert von 91,16 zeigt, dass die Teilnehmer beider Gruppen das System als gebrauchstauglich wahrnehmen. Demzufolge werden die Benutzer effektiv, effizient und zufriedenstellend beim Erlernen manueller Montageprozeduren unterstützt.

Für die verschiedenen Subskalen des NASA-TLX konnten keine signifikanten Mittelwertunterschiede zwischen den Gruppen festgestellt werden ($p > 0,05$). Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass die subjektiv wahrgenommene Beanspruchung durch das zusätzliche Level nicht gestiegen ist. Durch die Summierung der Messgrößen MD, PD, TD, E und F ergibt sich für die Gesamtbeanspruchung ein Wert (RTLX) von 31,14. Dies entspricht Grier [220] zufolge einer unter dem Durchschnitt ($RTLX < 45,29$) liegenden wahrgenommenen Beanspruchung.

5.5.6 Zusammenfassung der dritten formativen Evaluation

Das primäre Ziel dieser dritten formativen Evaluation war die Überprüfung der Nützlichkeit der optimierten HMD-basierten Trainingsanwendung mit zusätzlichem Level. Hierzu wurde ein Experiment mit 30 Versuchsteilnehmern durchgeführt, welche in zwei homogene Gruppen aufgeteilt wurden. Beide Gruppen absolvierten zunächst vier Trainingslevel (vgl. Abbildung 26), um die Montageprozedur eines Motors mit 15 Montageschritten zu erlernen. Während dieser aktiven Lernphasen erfolgte die physische Montage des Motors. Ergänzend dazu absolvierte die zweite Gruppe ein zusätzliches Level, welches auf Grundlage der Erkenntnisse aus der zweiten formativen Evaluation entwickelt wurde (vgl. Abschnitt 5.4.5). Dabei wiederholten die Probanden die Montagereihenfolge auf spielerische Art und Weise, wobei virtuelle Bauteile am physischen Motor verbaut wurden (vgl. Abbildung 40). Im Anschluss daran erfolgte ein Test, bei dem die Versuchsteilnehmer beider Gruppen aufgefordert wurden, den Motor ohne unterstützendes Assistenzsystem zu montieren. Die statistische Analyse der dabei erhobenen quantitativen Messgrößen lieferte signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Gruppen. Demnach benötigte die zweite Gruppe aufgrund des zusätzlichen Levels länger, um das Training zu absolvieren. Allerdings wirkte sich dieses positiv auf den Fähigkeitserwerb der Benutzer aus, da diese signifikant weniger Reihenfolgefehler (SM) während der Testphase machten. Auf Basis dieses Ergebnisses lässt sich festhalten, dass die Effektivität des Trainingssystems durch die Softwareoptimierung gesteigert werden konnte und somit die Nützlichkeit nachgewiesen wurde.

Ergänzend dazu wurde die SUS verwendet, um die subjektiv wahrgenommene Gebrauchstauglichkeit des optimierten Systems zu bewerten. Der ermittelte Gesamtwert von 91,16 untermauert das Ergebnis der analysierten Effektivitäts- und Effizienzmessgrößen und verdeutlicht die hohe Gebrauchstauglichkeit des Trainingssystems. Zusätzlich dazu zeigt das Ergebnis des NASA-TLX, dass die subjektiv wahrgenommene Beanspruchung der Benutzer nach der Verwendung der HMD-basierten Trainingsanwendung unterdurchschnittlich hoch ist. Demnach erfolgt keine Beeinträchtigung der Benutzer während der Ausführung ihrer Montagetätigkeit durch das Trainingssystem.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse dieser dritten formativen Evaluation eine Antwort auf die dritte Forschungsfrage liefern:

Wie muss ein AR-basiertes Trainingssystem für manuelle Montagearbeitsplätze gestaltet werden, sodass es von den Anwendern als gebrauchstauglich bewertet wird?

Folglich befindet sich das iterativ optimierte Trainingssystem in einem ausgereiften Entwicklungsstadium und unterstützt Benutzer effektiv, effizient und zufriedenstellend beim Erlernen manueller Montageprozeduren. Weitere Optimierungen an dem zweiten Artefakt (vgl. Abbildung 6) sind demnach nicht notwendig.

Das System kann einer abschließenden summativen Evaluation unterzogen werden, wobei es gegenüber alternativen Anlernkonzepten anhand quantitativer und qualitativer Messgrößen getestet wird. Der nachfolgende Abschnitt gibt Aufschluss darüber.

5.6 Summative Evaluation

Die abschließende summative Evaluation wird als multivariater Test (vgl. Abschnitt 4.4.2) ausgeführt und liefert einen quantitativen und qualitativen Wirksamkeitsnachweis der HMD-basierten Trainingsanwendung. Als Alternative zu diesem Anlernkonzept werden ein Papier- und ein Trainer-basiertes Anlernkonzept verwendet.

Die Papieranleitung besteht aus 15 einzelnen laminierten Seiten, welche mit einem Heftstreifen zu einer Anlernmappe zusammengefasst sind. Demnach wird für jeden Montageschritt eine neue Seite verwendet. Entsprechend dem Konzept der HMD-basierten Trainingsanwendung, erhält der Proband für den ersten Montagedurchgang (Einführung) eine Papieranleitung mit sehr detaillierten Bild- und Textinformationen zu den einzelnen Montageschritten. Diese unterstützen sowohl bei der Entnahme der notwendigen Materialien und Werkzeuge als auch bei der korrekten Montage der Bauteile. Die bereitgestellten Informationen werden zwischen jedem Montagedurchgang sukzessive reduziert. Somit erhält ein Proband für jeden Montagedurchgang eine neue Papieranleitung mit 15 Seiten und den entsprechend reduzierten Informationen. Im zweiten Montagedurchgang (Anfänger) entfallen die Bildinformationen, welche die Entnahmepositionen der Bauteile und Werkzeuge zeigen. Im dritten Montagedurchgang (Fortgeschritten) erhalten die Benutzer eine Papieranleitung, welche lediglich Textinformationen enthält. Im vierten und letzten Montagedurchgang (Experte) werden die Textinformationen bis auf eine Angabe des Montageschritts (z.B. Schritt 8: Abdeckung hinten montieren) reduziert. Die nachfolgende Abbildung 43 zeigt das beschriebene Konzept der verschiedenen Papieranleitungen für die jeweiligen Montagedurchgänge am Beispiel des achten Montageschritts der ausgewählten Montageprozedur (vgl. Abschnitt 5.1.6).

























1. Einführung	<div>Schritt 8: Abdeckung hinten montieren.</div> <div><div>Bauteil: Abdeckung hinten Tätigkeit: montieren Material: 2 Stk. M6 x 16 (Innentorex) Werkzeug: T30</div></div>		2. Anfänger	<div>Schritt 8: Abdeckung hinten montieren.</div> <div><div>Bauteil: Abdeckung hinten Tätigkeit: montieren Material: 2 Stk. M6 x 16 (Innentorex) Werkzeug: T30</div></div>	
	<div>Schritt 8: Abdeckung hinten montieren.</div> <div><div>Bauteil: Abdeckung hinten Tätigkeit: montieren Material: 2 Stk. M6 x 16 (Innentorex) Werkzeug: T30</div></div>			<div>Schritt 8: Abdeckung hinten montieren.</div> <div><div>Bauteil: Abdeckung hinten Tätigkeit: montieren Material: 2 Stk. M6 x 16 (Innentorex) Werkzeug: T30</div></div>	
3. Fortgeschritten	<div>Schritt 8: Abdeckung hinten montieren.</div> <div><div>Bauteil: Abdeckung hinten Tätigkeit: montieren Material: 2 Stk. M6 x 16 (Innentorex) Werkzeug: T30</div></div>		4. Experte	<div>Schritt 8: Abdeckung hinten montieren.</div> <div><div>Bauteil: Abdeckung hinten Tätigkeit: montieren Material: 2 Stk. M6 x 16 (Innentorex) Werkzeug: T30</div></div>	
	<div>Schritt 8: Abdeckung hinten montieren.</div> <div><div>Bauteil: Abdeckung hinten Tätigkeit: montieren Material: 2 Stk. M6 x 16 (Innentorex) Werkzeug: T30</div></div>			<div>Schritt 8: Abdeckung hinten montieren.</div> <div><div>Bauteil: Abdeckung hinten Tätigkeit: montieren Material: 2 Stk. M6 x 16 (Innentorex) Werkzeug: T30</div></div>	

Abbildung 43: Konzept der Papieranleitungen für die verschiedenen Montagedurchgänge.

Quelle: eigene Darstellung.

Entsprechend dem Konzept der HMD-basierten Trainingsanwendung und der zuvor beschriebenen Papieranleitung wird das Anlernkonzept der dritten Gruppe mit dem Trainer (on-the-job) gestaltet. Dieses orientiert sich an einem vierstufigen Vorgehen [145]. Im ersten Montagedurchgang (Einführung) wird der Proband gebeten, den Trainer zu beobachten, zuzuhören und sich so viel wie möglich einzuprägen, während der Trainer den Motor montiert und dabei jeden Montageschritt detailliert erläutert. Zusätzlich dazu erhält der Proband das entsprechende Standardarbeitsblatt (SAB), welches die 15 Montageschritte in vorgegebener Reihenfolge abbildet. Nachdem der erste Montagedurchgang abgeschlossen ist, wird der Proband aufgefordert, die Montage zu wiederholen (Beginner). Während dieses zweiten Montagedurchgangs kann das SAB verwendet werden. Ergänzend dazu greift der Trainer ein, sobald der Proband einen Fehler macht oder Fragen hat. Im dritten Montagedurchgang (Fortgeschritten) steht dem Probanden das SAB erneut zur Verfügung, allerdings unterstützt der Trainer nur, wenn der Proband explizit danach fragt. Im vierten Montagedurchgang (Experte) erfolgt keine Unterstützung durch den Trainer. Lediglich das SAB steht dem Probanden zur Verfügung. Das beschriebene Anlernkonzept ist in der nachfolgenden Abbildung 44 zusammengefasst dargestellt.

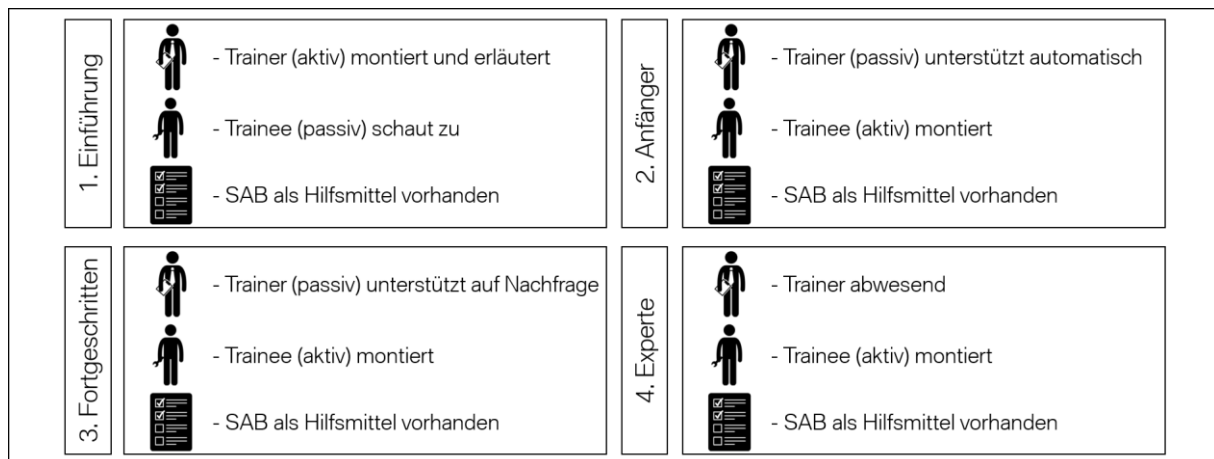


Abbildung 44: Anlernkonzept des Trainer-basierten Montagetrainings.

Quelle: eigene Darstellung.

Auf Basis eines Vergleichs der drei genannten Anlernkonzepte ergeben sich zahlreiche wissenschaftliche Erkenntnisse. Darüber hinaus wird der Forderung der Anwendungsdomäne, einen Wirksamkeitsnachweis zu liefern (vgl. Tabelle 11), entsprechend nachgekommen. Wie bereits in den drei formativen Evaluationen zuvor, erfolgt die summative Evaluation an dem im Abschnitt 5.3.1 erläuterten AP und der im Abschnitt 5.1.6 beschriebenen Montageprozedur. Die nachfolgenden Unterabschnitte geben Auskunft über das Versuchsdesign und den Versuchsablauf dieses finalen Experiments. Darüber hinaus werden nähere Informationen zu den Versuchsteilnehmern dargelegt. Den Abschluss dieser Evaluation bilden die Darlegung und Diskussion der Ergebnisse. Diese sind bereits teilweise in dem wissenschaftlichen Konferenzbeitrag von Werrlich et al. [222] veröffentlicht.

5.6.1 Versuchsdesign

Für die summative Evaluation wird ein between-subject Design mit drei homogenen Gruppen verwendet. Als unabhängige Variable wird die Art des Trainings definiert. Demnach absolviert die erste Gruppe das

Training unter Verwendung der finalen HMD-basierten Trainingsanwendung. Die zweite Gruppe nutzt die entsprechenden Papieranleitungen und die dritte Gruppe einen Trainer (on-the-job), um die 15 Montageschritte des Motors zu erlernen. Wie bereits bei der zweiten und dritten formativen Evaluation erfolgt das Experiment in zwei Phasen. Im Rahmen der ersten Phase, der Trainingsphase, montieren die Versuchsteilnehmer der drei Gruppen den Motor viermal (Einführung, Anfänger, Fortgeschritten, Experte) mit den ihnen zur Verfügung gestellten Informationen. Während dieser vier Montagedurchgänge werden folgende abhängige Messgrößen, analog zur zweiten formativen Evaluation (vgl. Abschnitt 5.4.1), zur Bewertung der Effektivität der Anlernkonzepte erhoben: Montagefehler (AM), selbst-korrigierte Montagefehler (CAM), durch Hilfe korrigierte Montagefehler (CBHA), Entnahmefehler (PM), selbst-korrigierte Entnahmefehler (CPM) und durch Hilfe korrigierte Entnahmefehler (CBHP). Bei der dritten Gruppe werden die genannten Messgrößen im Gegensatz zu den anderen beiden Gruppen nur während des dritten (Fortgeschritten) und vierten (Experte) Montagedurchgangs erhoben. Zur Beurteilung der Effizienz der drei Anlernkonzepte wird die Zeit zur Bewältigung des Einführungs-Levels (TLCT), des Anfänger-Levels (BLCT), des Fortgeschritten-Levels (ILCT), des Experte-Levels (ELCT), des zusätzlichen Levels (QLCT) und die gesamte Trainingszeit (TTCT), welche sich durch die Summe der Absolvierungsdauer der einzelnen Level ergibt, gemessen.

Nachdem die Trainingsphase abgeschlossen ist, erfolgt die Testphase, in der die Probanden der drei Gruppen aufgefordert werden, die Montage ohne unterstützendes Hilfsmittel (HMD, Papieranleitung, SAB und Trainer) zu wiederholen. Während dieser Phase werden folgende abhängige Variablen erhoben: Montagefehler (AM2), selbst-korrigierte Montagefehler (CAM2), durch Hilfe korrigierte Montagefehler (CBHA2), Entnahmefehler (PM2), selbst-korrigierte Entnahmefehler (CPM2), durch Hilfe korrigierte Entnahmefehler (CBHP2), Reihenfolgefehler (SM), selbst-korrigierte Reihenfolgefehler (CSM), durch Hilfe korrigierte Reihenfolgefehler (CBHS) und die Zeit zur Bewältigung der 15 Montageschritte (IRCT).

Ergänzend dazu werden die drei Gruppen gebeten, den NASA-TLX Fragebogen schriftlich auszufüllen. Dabei werden die folgenden sechs abhängigen Messgrößen erfasst, welche Auskunft über die mentale Beanspruchung (MD), die physische Beanspruchung (PD), die zeitliche Beanspruchung (TD), die Leistung (P), die Anstrengung (E) und die Frustration (F) der Benutzer während des Trainings liefern. Aufgrund der Erfahrungen aus den ersten zwei formativen Evaluationen wird anstatt des AttrakDiffs die Kurzversion des UEQs (vgl. Abschnitt 4.4.1) verwendet, um die pragmatische (PQ) und hedonische (HQ) Qualität der Anlernkonzepte zu bewerten (siehe Anhang). Dieser bietet gegenüber dem AttrakDiff folgende Vorteile:

- Die Bewertung der PQ und HQ ist ausgewogen.
- Aufgrund von nur acht gegensätzlichen Wortpaaren (Items) ergibt sich ein Effizienzvorteil.
- Statistische Datenauswertungen sind aufgrund der Datenzugänglichkeit möglich.
- Ein höherer Datenschutz ist gewährleistet, da der Fragebogen nicht online durchgeführt wird.

Die einfache Zugänglichkeit der Daten ermöglicht einen statistischen Vergleich der einzelnen Items zwischen den Gruppen. Daher werden ergänzend zur PQ und HQ die abhängigen Messgrößen Item1 bis Item 8 erhoben.

Neben den verschiedenen quantitativen Daten werden qualitative Nutzeraussagen erfasst, welche den Abschluss der formativen Evaluation bilden. Hierzu werden die Versuchsteilnehmer jeder Gruppe im Anschluss an das Experiment mit Hilfe eines teilstrukturierten Interviewleitfadens befragt (siehe Anhang). Die Aussagen werden mit einem Diktiergerät aufgenommen und im Anschluss nach der Methode von Dresing und Pehl [138] transkribiert und entsprechend der TBCA [139] analysiert.

5.6.2 Versuchsteilnehmer

Die Erfahrungen der formativen Evaluationen haben gezeigt, dass die Akquise von taktgebundenen Montagearbeitern sehr schwierig und kostenintensiv ist, da diese für die Versuchsdauer (ca. 3 Stunden) von einem Springer (vgl. Abschnitt 3.4.5) ersetzt werden müssen. Daher werden für die finale summative Evaluation 45 Personen (25 männlich, 5 weiblich) akquiriert, die eine technische Berufsausbildung im zweiten oder dritten Lehrjahr absolvieren. Deren Alter schwankt zwischen 15 und 25 Jahren ($M = 18,28$; $SD = 1,99$). Die Probanden werden homogen auf drei Gruppen zu je 15 Versuchsteilnehmern aufgeteilt. Mit Hilfe einer fünfstufigen Likert-Skala werden, adäquat der formativen Evaluationen, die Erfahrungen im Kontext der manuellen Montage und im Umgang mit AR-basierten Systemen erhoben. Die drei Gruppen weisen bereits Kenntnisse im Bereich der manuellen Montage ($M = 1,93$; $SD = 0,87$) auf und haben sehr geringe Erfahrung im Umgang mit AR-basierten Systemen ($M = 0,22$; $SD = 0,63$). Die Versuchsteilnehmer beherrschen die deutsche Sprache, um alle Instruktionen, welche durch die Anlernkonzepte bereitgestellt werden, zu verstehen. Darüber hinaus hat keiner der Probanden zuvor an einem der Experimente teilgenommen oder kennt die Montage des bereitgestellten Motors.

5.6.3 Versuchsablauf

Vor dem Experiment werden zunächst 45 Versuchsteilnehmer akquiriert. Hierzu wird Kontakt mit der Berufsausbildungsstätte der BMW Group in München aufgenommen und die Zielsetzung des Versuchs erläutert. Die Auswahl der Probanden erfolgt durch die Ausbilder. Dabei ist wichtig, dass die Teilnahme freiwillig ist, keiner der Auszubildenden zuvor an dem Versuch teilgenommen hat oder Erfahrungen mit der Montage des ausgewählten Motors aufweist. Vor Beginn eines Experiments wird jeder Proband darüber informiert, dass entsprechende Arbeitskleidung und Sicherheitsschuhe an dem Versuchstag mitzubringen sind. An einem Versuchstag können maximal zwei Evaluationen mit jeweils einer Person durchgeführt werden, da die Erfahrungen gezeigt haben, dass die Versuchsdauer zwischen drei und vier Stunden beträgt.

Nachdem der Proband begrüßt wurde, erläutert ein Evaluator die Versuchsumgebung und den Versuchsablauf. Zusätzlich wird jeder Proband darauf hingewiesen, dass der Versuch jederzeit abgebrochen werden kann, wenn sich die Person unwohl fühlt. Nach Abschluss der Einführung wird bei jedem Probanden der ersten Gruppe die IPD gemessen und die Microsoft HoloLens daraufhin individuell eingestellt. Dadurch wird die korrekte räumliche Darstellung der virtuellen Inhalte gewährleistet. Danach erhält der

Proband das HMD, welches von einem Evaluator auf dessen Kopf positioniert und ergonomisch eingestellt wird. Wie bereits bei den formativen Evaluationen wird der Kopfbügel (vgl. Abbildung 18) verwendet, um das Gewicht des HMDs gleichmäßig auf dem Kopf des Benutzers zu verteilen. Mit Hilfe der installierten Software (Learn Gesture) des HMDs erhält der Proband vor Beginn des eigentlichen Versuchs eine kurze Einweisung in die Interaktionsmodalitäten (vgl. Abbildung 29). Für die Versuchsteilnehmer der zweiten und dritten Gruppe sind bis auf eine Erläuterung des Versuchsablaufs keine weiteren Vorbereitungen notwendig.

Die summative Evaluation gliedert sich in eine Trainingsphase und eine Testphase. Das Ziel der Trainingsphase ist das Erlernen einer Montageprozedur, bestehend aus 15 Montageschritten mit 65 Teilaufgaben (vgl. Abbildung 23). Dazu montieren die Versuchsteilnehmer der drei Gruppen den Motor viermal mit den ihnen zur Verfügung gestellten Hilfsmitteln. Die erste Gruppe nutzt die HMD-basierte Trainingsanwendung (vgl. Abbildung 26), die zweite Gruppe die verschiedenen Papieranleitungen (vgl. Abbildung 43) und die dritte Gruppe trainiert mit einem Trainer und dem SAB (vgl. Abbildung 44). Während die Probanden die Montagedurchgänge absolvieren, erheben zwei Evaluatoren quantitative Daten hinsichtlich der Effektivität und Effizienz der verschiedenen Anlernkonzepte (vgl. Abschnitt 5.6.1). Nachdem ein Level bzw. Montagedurchgang erfolgreich abgeschlossen wurde, erfolgt eine zehnminütige Pause. Während dieser kurzen Unterbrechung wird der Motor demontiert und alle Bauteile und Werkzeuge werden an ihre ursprüngliche Position gebracht. Die Versuchsteilnehmer können sich ausruhen und an dem Buffet bedienen, welches als Vergütung für deren Versuchsteilnahme zur Verfügung gestellt wird. Nachdem alle Montagedurchgänge absolviert wurden, wird die erste Gruppe gebeten, das zusätzliche Level (vgl. Abbildung 40) zu absolvieren. Um eine Vergleichbarkeit unter den Gruppen herzustellen, erhalten die Probanden der zweiten und dritten Gruppe fünf Minuten, um sich die Inhalte der verschiedenen Papieranleitungen bzw. des SABs einzuprägen.

Nach der Trainingsphase erfolgt die Testphase, in der die Probanden der drei Gruppen gebeten werden, die erlernte Montageprozedur ohne jegliche Unterstützung wiederholt auszuführen. Während diesem letzten Montagedurchgang werden die Montagezeit, die Montage-, die Entnahme- und die Reihenfolgefehler (vgl. Abschnitt 5.6.1) von zwei Evaluatoren erhoben.

Im Anschluss an die beiden Phasen werden alle Versuchsteilnehmer gebeten, den NASA-TLX und UEQ Fragebogen handschriftlich auszufüllen. Abschließend werden die Gruppen bezüglich ihrer Erfahrungen, Meinungen, Gedanken und Gefühle mit dem jeweiligen Anlernkonzept von einem Evaluator mit Hilfe eines teilstrukturierten Interviewleitfadens befragt. Der zweite Evaluator zeichnet das Gespräch mit einem Diktiergerät auf. Die qualitativen Aussagen der 45 Versuchsteilnehmer werden nach Beendigung der summativen Evaluation transkribiert und analysiert. Für die Auswertung und Analyse der quantitativen Daten wird die Software IBM SPSS Statistics verwendet. Die Ergebnisse dieser finalen summativen Evaluation sind in dem nachfolgenden Abschnitt dargelegt.

5.6.4 Ergebnisse

Die deskriptive Statistik der quantitativen Messgrößen zur Beurteilung der Effizienz der verschiedenen Anlernkonzepte wird in der nachfolgenden Tabelle 28 zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 28: Deskriptive Statistik der Effizienzmessgrößen– summative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

Phasen	Messgrößen	Gruppe 1 -Brille-		Gruppe 2 -Papieranleitung-		Gruppe 3 -Trainer-		Gesamt	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Trainingsphase	TLCT [s]	2747,33	517,03	1367,86	197,36	968,73	128,44	1694,64	825,25
	BLCT [s]	1407,86	348,07	904,80	171,68	1013,13	193,90	1108,60	324,49
	ILCT [s]	1227,06	453,72	811,06	154,64	857,20	153,30	965,11	336,84
	ELCT [s]	973,53	202,19	667,06	144,61	724,26	167,79	788,32	213,75
	QLCT [s]	806,00	736,92	300,00	0	300,00	0	468,66	475,23
	TTCT [s]	7161,80	1292,92	4050,80	504,37	3863,33	561,85	4850,00	1482,30
Testphase	IRCT [s]	702,46	144,96	600,86	121,12	747,00	125,71	683,44	140,56

Entsprechend den Ergebnissen des Shapiro-Wilk-Tests waren die Daten der Messgrößen BLCT, TTCT und IRCT in allen drei Gruppen normalverteilt ($p > 0,05$). Allerdings zeigten die Ergebnisse des Levene-Tests, dass das Kriterium der Varianzhomogenität durch die Daten der Messgröße TTCT verletzt wird ($p < 0,001$), sodass nur für die Messgrößen BLCT und IRCT eine einfaktorielle Anova durchgeführt werden konnte. Die Ergebnisse zeigten, dass signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Gruppen für die Messgrößen BLCT ($F(2,42) = 16,760$; $p < 0,001$) und IRCT ($F(2,42) = 4,903$; $p < 0,001$) vorliegen. Mit Hilfe eines Post-hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur wurde durch einen paarweisen t-Test schließlich geprüft, zwischen welchen Gruppen diese signifikanten Unterschiede bestehen. Folgende Ergebnisse lieferte der Test:

- Zur Absolvierung des Anfänger-Levels (zweiter Montagedurchgang) benötigte die zweite Gruppe 35,73% und die dritte Gruppe 28,03% weniger Zeit als die erste Gruppe.
- Die Testphase absolvierte die zweite Gruppe 14,46% schneller als die erste Gruppe und 19,56% schneller als die dritte Gruppe.

Für die nicht-normalverteilten Effizienzmessgrößen wurde der Kruskal-Wallis-Test verwendet, um signifikante Mittelwertunterschiede zu identifizieren. Die Ergebnisse zeigten, dass für die Messgrößen TLCT ($\text{Chi-Quadrat}(2) = 37,789$; $p < 0,001$), ILCT ($\text{Chi-Quadrat}(2) = 13,317$; $p < 0,001$), ELCT ($\text{Chi-Quadrat}(2) = 17,770$; $p < 0,001$) und TTCT ($\text{Chi-Quadrat}(2) = 29,707$; $p < 0,001$) signifikante Unterschiede vorliegen. Allerdings ging aus diesen Ergebnissen nicht hervor, welche der drei Gruppen sich signifikant voneinander unterscheiden. Hierzu wurde ein Dunn-Bonferroni-Test durchgeführt, welcher die Unterschiede zwischen den Gruppen aufzeigt. Die signifikanten Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 29 aufgeführt.

Tabelle 29: Ergebnis des Dunn-Bonferroni-Tests der signifikanten Effizienzmessgrößen.

Quelle: eigene Darstellung.

Messgrößen	Paarweiser Vergleich	z	p	r	Bedeutung der Effektstärke
TLCT	Gruppe 3- Gruppe 2	2,905	0,11	0,53037801	stark
	Gruppe 3- Gruppe 1	6,144	<0,001	1,1217358	stark
	Gruppe 2- Gruppe 1	3,239	0,04	0,59135779	stark
ILCT	Gruppe 2- Gruppe 1	3,461	0,02	0,63188926	stark
	Gruppe 3- Gruppe 1	2,732	0,19	0,49879268	stark
ELCT	Gruppe 2- Gruppe 1	4,018	<0,001	0,73358308	stark
	Gruppe 3- Gruppe 1	3,114	0,06	0,56853601	stark
TTCT	Gruppe 3- Gruppe 1	4,991	<0,001	0,91122776	stark
	Gruppe 2- Gruppe 1	4,393	<0,001	0,8020484	stark

Aus den Ergebnissen des Dunn-Bonferroni-Tests, welcher durch einen paarweisen Vergleich die signifikanten Unterschiede zwischen den drei Gruppen lieferte, gehen folgende Ergebnisse hervor:

- Die zweite Gruppe benötigte 50,21% und die dritte Gruppe 64,74% weniger Zeit als die erste Gruppe, um das Einführung-Level (erster Montagedurchgang) zu absolvieren. Darüber hinaus absolvierte die dritte Gruppe das Einführung-Level 29,18% schneller als die zweite Gruppe.
- Für das Fortgeschritten-Level (dritter Montagedurchgang) benötigte die zweite Gruppe 33,90% und die dritte Gruppe 30,14% weniger Zeit als die erste Gruppe.
- Zur Absolvierung des Experte-Levels (vierter Montagedurchgang) benötigten die Probanden der zweiten Gruppe durchschnittlich 31,48% und die Probanden der dritten Gruppe durchschnittlich 25,60% weniger Zeit als die erste Gruppe.
- Die gesamte Trainingsphase absolvierten die zweite Gruppe 43,43% und die dritte Gruppe 46,05% schneller als die erste Gruppe.

Neben den Messgrößen zur Beurteilung der Effizienz der verschiedenen Anlernkonzepte wurden die im Abschnitt 5.6.1 beschriebenen Effektivitätsmessgrößen innerhalb der Trainings- und Testphase erhoben. Die nachfolgende Tabelle 30 gibt Aufschluss auf die deskriptive Statistik der ermittelten Messgrößen.

Tabelle 30: Deskriptive Statistik der Effektivitätsmessgrößen– summative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

Phasen	Messgrößen	Gruppe 1 -Brille-		Gruppe 2 -Papieranleitung-		Gruppe 3 -Trainer-		Gesamt	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Trainingsphase	AM	1,60	1,12	4,06	1,86	0,87	0,91	2,17	1,92
	CAM	0,40	0,73	1,47	1,99	0,33	1,05	0,73	1,43
	CBHA	0,13	0,35	0,13	0,35	2,80	2,40	1,02	1,87
	PM	0,66	1,29	0,67	0,98	0,67	1,18	0,67	1,12
	CPM	0,53	0,91	1,00	1,41	0,80	0,86	0,77	1,04
	CBHP	0,46	0,83	0,33	0,72	5,60	2,82	2,13	3,01
Testphase	SM	0,66	0,97	4,07	3,10	4,07	2,99	2,93	2,97
	CSM	0,46	0,83	0	0	0,13	0,35	0,20	0,54
	CBHS	0	0	0	0	0	0	0	0
	AM2	0,06	0,25	0,07	0,26	0,33	0,62	0,15	0,42
	CAM2	0	0	0,13	0,35	0,27	0,79	0,13	0,50
	CBHA2	0	0	0	0	0	0	0	0
	PM2	0	0	0	0	1,40	1,55	0,46	1,09
	CPM2	0,06	0,25	0,33	0,62	0,33	0,62	0,24	0,52
	CBHP2	0	0	0	0	0	0	0	0

Die Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests zeigten für keine der analysierten Messgrößen eine Normalverteilung ($p < 0,05$). Daher wurde für den Vergleich der unabhängigen Gruppen der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Entsprechend dem Ergebnis liegen für folgende Variablen signifikante Mittelwertunterschiede vor: AM (Chi-Quadrat(2)= 24,784; $p < 0,001$), CAM (Chi-Quadrat(2)= 6,113; $p = 0,47$), CBHA (Chi-Quadrat(2)= 25,770; $p < 0,001$), CBHP (Chi-Quadrat(2)= 29,830; $p < 0,001$), SM (Chi-Quadrat(2)= 14,351; $p = 0,01$), PM2 (Chi-Quadrat(2)= 18,807; $p < 0,001$).

Um konkrete Unterschiede zwischen den Gruppen für die signifikanten Messgrößen herauszufinden, musste ein Dunn-Bonferroni-Test durchgeführt werden. Die paarweisen Vergleiche, welche signifikante Unterschiede lieferten, sind in der nachfolgenden Tabelle 31 aufgeführt.

Tabelle 31: Ergebnis des Dunn-Bonferroni-Tests der signifikanten Effektivitätsmessgrößen.

Quelle: eigene Darstellung.

Messgrößen	Paarweiser Vergleich	z	p	r	Bedeutung der Effektstärke
AM	Gruppe 3- Gruppe 2	4,852	<0,001	0,72	stark
	Gruppe 1- Gruppe 2	-3,393	0,02	0,50	stark
CAM	Gruppe 3- Gruppe 2	2,394	0,05	0,35	mittel
CBHA	Gruppe 1- Gruppe 3	-4,396	<0,001	0,65	stark
	Gruppe 2- Gruppe 3	-4,396	<0,001	0,65	stark
CBHP	Gruppe 2- Gruppe 3	-4,911	<0,001	0,73	stark
	Gruppe 1- Gruppe 3	-4,525	<0,001	0,67	stark
SM	Gruppe 1- Gruppe 2	-3,218	0,004	0,47	mittel
	Gruppe 1- Gruppe 3	-3,340	0,003	0,49	mittel

PM2	Gruppe 1- Gruppe 3	-3,756	0,001	0,55	stark
	Gruppe 2- Gruppe 3	-3,756	0,001	0,55	stark

Demnach machten die erste Gruppe 60,56% und die dritte Gruppe 78,57% signifikant weniger Montagefehler (AM) als die zweite Gruppe während der Trainingsphase. Allerdings korrigierten die Probanden der zweiten Gruppe ihre Montagefehler (CAM) signifikant häufiger (345,45%) in der Trainingsphase als die dritte Gruppe. Die erste und zweite Gruppe fragten die Evaluatoren 95,35% weniger um Hilfe bei der Bauteilmontage (CBHA) als die dritte Gruppe. Bei der Bauteilentnahme (CBHP) benötigten die erste Gruppe 91,78% und die zweite Gruppe 94,10% signifikant weniger Hilfe als die dritte Gruppe. Die Testphase absolvierten die Probanden der ersten und zweiten Gruppe im Vergleich zur dritten Gruppe ($M=1,40$; $SD=1,55$) ohne Entnahmefehler (PM2). Darüber hinaus machte die erste Gruppe 83,78% signifikant weniger Reihenfolgefehler (SM) als die zweite und dritte Gruppe.

Neben den Effizienz- und Effektivitätsmessgrößen wurden die verschiedenen Subskalen des NASA-TLX erfasst, um die subjektiv wahrgenommene Beanspruchung der Versuchsteilnehmer zu messen. Die nachfolgende Tabelle 32 gibt Aufschluss über die deskriptive Statistik der Messgrößen.

Tabelle 32: Deskriptive Statistik des NASA-TLX– summative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

Messgrößen	Gruppe 1 -Brille-		Gruppe 2 -Papieranleitung-		Gruppe 3 -Trainer-		Gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
MD	7,86	4,50	11,73	5,56	12,80	4,34	10,80	5,18
PD	5,53	3,88	3,33	4,11	5,46	3,39	4,77	3,86
TD	3,40	2,87	6,67	4,22	5,86	4,73	5,31	4,17
P	17,33	3,97	15,73	3,51	11,60	5,39	14,89	4,91
E	8,53	5,91	5,40	3,75	8,00	4,64	7,31	4,93
F	3,80	3,91	5,60	5,13	6,80	4,32	5,40	4,55

Dem Shapiro-Wilk-Test zufolge waren die Daten der Messgröße TD in allen drei Gruppen normalverteilt ($p>0,05$). Darüber hinaus war das Kriterium der Varianzhomogenität nach dem Levene Test gegeben ($p=0,284$). Demzufolge konnte eine einfaktorielle Anova angewendet werden. Diese lieferte allerdings keine signifikanten Unterschiede für TD ($F(2,42)=2,691$; $p=0,79$).

Für alle anderen nicht-normalverteilten Messgrößen ($p<0,05$) wurde der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Dieser zeigte signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Gruppen für MD (Chi-Quadrat(2)= 7,608; $p<0,022$) und P (Chi-Quadrat(2)= 12,297; $p<0,002$). Für die Messgrößen PD, E und F liegen keine signifikanten Unterschiede vor ($p>0,05$).

Die Ergebnisse des Dunn-Bonferroni-Tests in der nachfolgenden Tabelle 33 machen deutlich, zwischen welchen Gruppen signifikante Unterschiede für die Messgrößen MD und P vorliegen.

Tabelle 33: Ergebnis des Dunn-Bonferroni-Tests der signifikanten Subskalen des NASA-TLX.

Quelle: eigene Darstellung.

Messgrößen	Vergleich	z	p	r	Bedeutung der Effektstärke
MD	Gruppe 1- Gruppe 3	-2,654	0,024	0,39	mittel
P	Gruppe 3- Gruppe 1	3,588	0,001	0,53	stark

Die mentale Beanspruchung (MD) der Probanden der ersten Gruppe war während der Absolvierung der Montage um 38,59% geringer als bei den Versuchsteilnehmern der dritten Gruppe. Darüber hinaus beurteilte die dritte Gruppe ihre Leistung (P) 33,06% schlechter als die erste Gruppe.

Zur Erhebung der PQ und HQ wurde der UEQ verwendet. Die nachfolgende Tabelle 34 gibt Aufschluss über die deskriptive Statistik der ermittelten Messgrößen.

Tabelle 34: Deskriptive Statistik der Messgrößen PQ und HQ- summative Evaluation.

Quelle: eigene Darstellung.

Messgrößen	Gruppe 1 -Brille-		Gruppe 2 -Papieranleitung-		Gruppe 3 -Trainer-		Gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
PQ	2,25	0,29	2,06	0,75	1,76	0,82	2,02	0,68
HQ	2,45	0,45	0,68	1,45	1,13	1,00	1,42	1,28

Die Daten der Messgröße HQ waren entsprechend dem Ergebnis des Shapiro-Wilk-Tests in allen drei Gruppen normalverteilt ($p > 0,05$). Allerdings zeigte der Levene-Test, dass keine Varianzhomogenität vorlag ($p = 0,006$). Da dieses Kriterium verletzt wurde und die Daten der Messgröße PQ nicht normalverteilt waren ($p < 0,05$), wurden für beide Messgrößen der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Die Ergebnisse zeigten, dass für PQ ($\text{Chi-Quadrat}(2) = 3,342$; $p = 0,188$) keine signifikanten und für HQ ($\text{Chi-Quadrat}(2) = 19,133$; $p < 0,001$) signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen vorlagen.

Der Dunn-Bonferroni-Test lieferte über einen paarweisen Vergleich der Gruppen genauere Erkenntnisse. Die nachfolgende Tabelle 35 fasst die signifikanten Ergebnisse zusammen.

Tabelle 35: Ergebnis des Dunn-Bonferroni-Tests für die Messgröße HQ.

Quelle: eigene Darstellung.

Messgröße	Paarweiser Vergleich	z	p	r	Bedeutung der Effektstärke
HQ	Gruppe 2- Gruppe 1	4,039	<0,001	0,60	stark
	Gruppe 3- Gruppe 1	3,474	0,002	0,51	stark

Die zweite Gruppe bewertete die HQ ihres Anlernkonzept 72,24% und die dritte Gruppe 53,87% signifikant schlechter als die erste Gruppe.

Um einen genaueren Einblick in die PQ und HQ der verschiedenen Anlernkonzepte zu erlangen, müssen die acht gegensätzlichen Adjektive betrachtet werden, welche die Probanden mit Hilfe einer siebenstufigen Likert-Skala bewertet haben. Die nachfolgende Abbildung 45 fasst die Resultate grafisch zusammen.

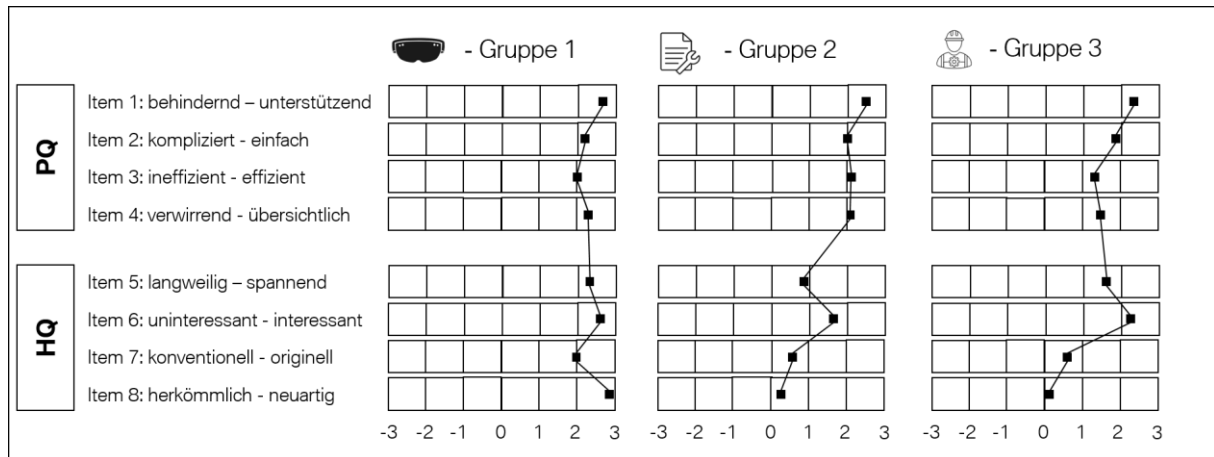


Abbildung 45: Ergebnis der verschiedenen Items des UEQs.

Quelle: eigene Darstellung.

Zusätzlich zu der zuvor gezeigten grafischen Darstellung, gibt die nachfolgende Tabelle 36 Aufschluss über die deskriptive Statistik der verschiedenen Items des UEQs.

Tabelle 36: Deskriptive Statistik der verschiedenen Items des UEQs.

Quelle: eigene Darstellung.

	Gruppe 1 -Brille-		Gruppe 2 -Papieranleitung-		Gruppe 3 -Trainer-		Gesamt	
Messgrößen	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Item 1	2,67	0,48	2,46	0,51	2,26	0,88	2,46	0,66
Item 2	2,13	0,63	2,00	1,13	1,93	0,96	2,02	0,91
Item 3	2,00	0,65	2,06	0,88	1,33	1,29	1,80	1,01
Item 4	2,20	0,86	2,13	0,83	1,53	1,18	1,95	0,99
Item 5	2,26	0,70	0,93	1,43	1,67	0,97	1,62	1,19
Item 6	2,60	0,50	1,73	1,57	2,20	0,94	2,17	1,13
Item 7	2,00	1,00	0,60	1,54	0,60	1,12	1,06	1,38
Item 8	2,93	0,25	0,26	1,98	0,06	1,98	1,08	2,06

Die Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests zeigten für keine der Messgrößen eine Normalverteilung ($p < 0,05$). Daher wurde der Kruskal-Wallis Test verwendet, welcher für ITEM 5 ($\text{Chi-Quadrat}(2) = 9,496$; $p = 0,009$), ITEM 7 ($\text{Chi-Quadrat}(2) = 10,888$; $p = 0,004$) und ITEM 8 ($\text{Chi-Quadrat}(2) = 22,934$; $p < 0,001$) signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen lieferte.

Mit Hilfe eines Dunn-Bonferroni-Tests wurden die Unterschiede zwischen den Gruppen ermittelt. Die nachfolgende Tabelle 37 gibt Aufschluss über die signifikanten paarweisen Vergleiche.

Tabelle 37: Ergebnis des Dunn-Bonferroni-Tests für die signifikanten Items des UEQs.

Quelle: eigene Darstellung.

Messgrößen	Vergleich	z	p	r	Bedeutung der Effektstärke
Item 5	Gruppe 2- Gruppe 1	3,078	0,006	0,45	mittel
Item 7	Gruppe 3- Gruppe 1	2,996	0,008	0,44	mittel
	Gruppe 2- Gruppe 1	2,696	0,021	0,40	mittel
Item 8	Gruppe 3- Gruppe 1	4,310	<0,001	0,64	stark
	Gruppe 2- Gruppe 1	3,963	<0,001	0,59	stark

Für das Item 5 bestand den Ergebnissen zufolge ein signifikanter Unterschied zwischen der ersten und zweiten Gruppe. Dieses Item wurde von der zweiten Gruppe 58,84% schlechter bewertet als von der ersten Gruppe. Demnach langweilt es die Probanden, das Montagetraining mit der Papieranleitung zu absolvieren.

Das Item 7 bewerteten die zweite und dritte Gruppe 70,00% schlechter als die erste Gruppe. Dem Konzept mit den Papieranleitungen und dem Trainer fehlen es demnach an Originalität. Diese Konzepte werden von den Versuchsteilnehmern eher als konventionell empfunden. Bestätigt wird dieses Ergebnis auch von der Bewertung der Messgröße Item 8. Letzteres wurde von der zweiten Gruppe 91,12% und von der dritten Gruppe 97,95% schlechter bewertet als von der ersten Gruppe. Demnach wird nur die HMD-basierte Trainingsanwendung als besonders neuartig empfunden.

Ergänzend zu den bereits genannten Ergebnissen, wurden die Probanden der drei Gruppen zum Abschluss des Experiments mit Hilfe eines teilstrukturierten Interviewleitfadens befragt. Die qualitativen Aussagen wurden mit einem Diktiergerät aufgenommen, transkribiert und analysiert. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst aufgezeigt.

Bezüglich der HMD-basierten Trainingsanwendung äußerten die Probanden, dass „die bereitgestellten Informationen über die Bedienoberfläche einfach gestaltet und leicht verständlich sind“. Einige Probanden ergänzten diese Aussage und legten dar, dass die Anwendung den Benutzer mit einer „Menge an vielen nützlichen Informationen“ versorgt. Die Interaktion per Sprachbefehl wurde von den meisten Personen präferiert, denn sie erlaubt „ein freihändiges Arbeiten mit dem System“. Allerdings stellten auch vier Probanden heraus, dass „die Nutzung der Sprachbefehle und die Ausgabe von Sprachanweisungen in lauten Umgebungen schwierig werden könnte“. Im Gegensatz zur Sprachinteraktion bevorzugte ein Proband die Gesteninteraktion, da er vermutete, dass seine „Kollegen versuchen würden, die Anwendung fremd zu steuern“. Diese Vermutung ist durchaus interessant, da die Microsoft HoloLens nicht in der Lage ist, die Stimme des Benutzers zu erkennen bzw. zu filtern. Dadurch könnten Personen, die sich in der Nähe des HMDs befinden und die notwendigen Sprachbefehle kennen, die Software fremdsteuern. Bezüglich der Gesteninteraktion ergänzte ein weiterer Versuchsteilnehmer, dass sich diese „unnatürlich anfühlt und eigenartig aussieht“. Hinsichtlich der Video-Funktionalität stellten die befragten Personen heraus, dass „die Instruktionen sehr hilfreich sind und maßgeblich dazu beitragen, die Montageschritte zu verstehen“. Die Tunnel-Funktionalität hoben die Probanden als ihren Favoriten hervor, da dieser „so futuristisch aussieht

und optimal bei der Entnahme der korrekten Bauteile und Werkzeuge unterstützt“. Ergänzend dazu erwähnte eine Person folgendes: „die Anleitung durch den Tunnel ist so stark, dass [man] sich wie ein Roboter fühlt. [Ich] muss gar nicht mehr nachdenken, was zu tun ist“. Diese Aussage verdeutlicht, dass diese Funktionalität nur temporär zu Beginn des Trainings bereitgestellt werden sollte, um eine zu starke Anleitung und damit mögliche Systemabhängigkeit des Benutzers zu vermeiden. In Bezug auf die Überlagerung der virtuellen Objekte mit den korrespondierenden realen Objekten äußerten die befragten Personen, dass diese „nicht perfekt aber ausreichend ist, um die Lage und Montageposition des Bauteils zu verstehen“. Hinsichtlich der Gamification-Elemente legten die Probanden folgendes dar: „der kleine Roboter ist niedlich“ und „die spielerischen Animationen sind sehr lustig und bringen [mich] zum Lächeln“. Ergänzend dazu empfanden die Probanden das zusätzliche Level (vgl. Abbildung 40) als „sehr spielerisch und hilfreich, um die Montagereihenfolge zu erlernen“. Bei der abschließenden Frage nach dem Gesamteindruck des Systems drückten nahezu alle Versuchsteilnehmer ihre Begeisterung und Faszination durch folgende Aussagen aus: „unglaublich, was heutzutage alles möglich ist“, „beeindruckend, wie gut das funktioniert hat“, „es macht [mir] super viel Spaß, damit zu arbeiten“, „richtig cool, wie ein Videospiel“. Im Gegensatz dazu äußerten vier Probanden: „die Software ist super, aber die Brille wird nach einer Weile sehr schwer und unangenehm auf dem Kopf“. Zusätzlich dazu empfanden die Benutzer „das Sichtfeld als zu klein“.

Als sehr hilfreich bei dem Konzept mit den Papieranleitungen empfanden die Versuchsteilnehmer „insbesondere die verschiedenen detailreichen Bilder“. Auch der Aufbau der Anleitungen und die Anordnung der verschiedenen Informationen „waren einfach und leicht verständlich“. Im Gegensatz dazu äußerten alle Personen, dass „das Tragen der Papieranleitung während der Montage sehr störend ist“ und „immer nur eine Hand zum Arbeiten frei ist“. Darüber hinaus wurde die Anleitung für den dritten Montagedurchgang (vgl. Abbildung 43) von den Versuchsteilnehmern als sehr schwierig wahrgenommen, da „lediglich Textinformationen und keine Bilder mehr vorhanden waren“. Dadurch fiel es den Probanden schwer, die korrekte Montageposition zu finden, was dazu führte, dass einige Personen um den Motor liefen und versuchten, die korrekte Montageposition zu finden. Daraufhin äußerte ein Proband, dass die Absolvierung mit den Papieranleitungen „geistig sehr anstrengend war, da [man] alles von dem Blatt in die Realität übersetzen musste“.

Bezüglich des Trainer-basierten Anlernkonzepts empfanden die Probanden es als besonders hilfreich, „dass der Trainer die Montage zunächst einmal vorführt und erläutert“, „bei Fragen zur Verfügung steht“ und „spezielle Handgriffe und Tricks erläutern kann“. Darüber hinaus „gibt der Trainer sofort Feedback, wenn [man] etwas falsch gemacht hat“. Allerdings legten auch einige Personen dar, dass sie sich oft „gehemmt fühlen, dem Trainer zu viele Fragen zu stellen“, da sie sich sonst „dumm fühlen“. Als Ergänzung äußerte ein Teilnehmer, dass „nicht jeder Trainer in der Lage ist, jemanden anzulernen“ und in der Produktion häufig „Sprachunterschiede vorhanden sind, die das Training und die Kommunikation erschweren“.

5.6.5 Diskussion der Ergebnisse

Die statistische Auswertung der Effizienzmessgrößen hat gezeigt, dass die Gruppe mit der HMD-basierenden Trainingsanwendung den ersten Montagedurchgang (Einführung) signifikant langsamer als die beiden

anderen Gruppen absolvierte. Das lässt sich dadurch begründen, dass die Benutzung eines solchen Systems völlig neuartig für alle Probanden war und das Erlernen der Interaktionsmodalitäten eine gewisse Eingewöhnungszeit erforderte. Darüber hinaus haben die Benutzer viel Zeit damit verbracht, die Funktionalitäten der Software ausgiebig zu testen und das System kennenzulernen. Demnach waren die Video-Instruktionen sehr hilfreich aber zeitaufwändig. Zusätzlich dazu absolvierte die zweite Gruppe den ersten Montagedurchgang signifikant langsamer als die dritte Gruppe. Die Ursache dafür ist der erfahrene Trainer, welcher die Montage sehr gut kennt und diese dem Trainee im ersten Montagedurchgang vorführt und erläutert. Bei der Absolvierung der weiteren Trainingsdurchgänge hat sich zudem gezeigt, dass sich die Absolvierungsdauer bei allen Gruppen mit zunehmendem Montagedurchgang verringert. Dabei war die erste Gruppe in allen Durchgängen signifikant langsamer als die beiden anderen Gruppen. Allerdings zeigen die Ergebnisse auch, dass sich die Absolvierungsdauer bei der ersten Gruppe viel stärker reduzierte als bei der zweiten und dritten Gruppe. Den zweiten Montagedurchgang beispielsweise bewältigte die erste Gruppe 48,75% schneller im Vergleich zum ersten Montagedurchgang, während sich die Zeit bei der zweiten Gruppe nur um 33,85% verringerte und bei der dritten Gruppe um 4,58% erhöhte. Dadurch wird deutlich, dass die Benutzer der ersten Gruppe mit zunehmender Nutzungsdauer lernen, mit dem System umzugehen und zudem die notwendigen Fähigkeiten (sensomotorische und kognitive) erwerben, um die Arbeitsaufgabe erfolgreich zu absolvieren. Folglich kann eine weitere und regelmäßige Verwendung des HMDs dazu führen, dass die Benutzer eine ähnliche Absolvierungsdauer wie die Probanden erreichen, die mit dem Trainer oder einer Papieranleitung angelernt werden.

Die statistische Auswertung der Effektivitätsmessgrößen zeigt, dass die zweite Gruppe während der Trainingsphase (Absolvierung der vier Montagedurchgänge) signifikant mehr Montagefehler (AM) machte als die zwei anderen Gruppen. Dieses Ergebnis lässt die Schlussfolgerung zu, dass die bereitgestellten 2D Informationen (Text und Bilder) über die verschiedenen Papieranleitungen unzureichend waren, um die Montage erfolgreich abzuschließen. Bestätigt wird das durch die qualitativen Aussagen einiger Probanden. Demnach müssen die Informationen der Bilder mit der Realität abgeglichen werden, was oft als sehr schwierig und geistig anstrengend wahrgenommen wird. Im Kontrast dazu bietet die AR-Technologie die Möglichkeit, Informationen am unmittelbaren Ort (lat. In-situ) anzuzeigen und den Benutzer mit multimodalen Informationen zu versorgen. Dadurch sinkt das Fehlerrisiko merklich. Neben den Montagefehlern wurden signifikante Unterschiede bei den durch Hilfe korrigierten Montage- (CBHA) und Entnahmefehlern (CBHP) festgestellt. Diese waren bei der dritten Gruppe signifikant höher als bei den anderen Gruppen. Der Grund hierfür ist die Bereitstellung eines Trainers. Die Probanden der dritten Gruppe nahmen die Hilfe des Trainers bewusst in Anspruch und baten um Hilfe, sobald sie Schwierigkeiten mit der Tätigkeitsausführung hatten. Unterschiedlich dazu versuchten die Probanden der beiden anderen Gruppen, die Montageschritte eher mit denen ihnen zur Verfügung gestellten Informationen zu lösen und nahmen potentielle Fehler in Kauf, anstatt einen der Evaluatoren um Hilfe zu bitten.

Die Ergebnisse der Testphase haben gezeigt, dass die erste Gruppe signifikant weniger Reihenfolgefehler (SM) als die zweite und dritte Gruppe macht. Demnach werden sowohl die sensomotorischen als auch die kognitiven Fähigkeiten, insbesondere die prozeduralen Fähigkeiten, durch die HMD-basierte Trainingsanwendung gestärkt. Im Gegensatz dazu führt das Training mit der Papieranleitung und dem Trainer lediglich zu einer verkürzten Absolvierungsdauer und einem Training der sensomotorischen Fähigkeiten. Dies hat

zur Folge, dass die Ausbildung eines mentalen Modells bei der zweiten und dritten Gruppe mangelhaft ist, wodurch schließlich ein geringerer Wissenstransfer stattfindet und schließlich Fehler in der Testphase entstehen [99]. Neben den Reihenfolgefehlern machten die Probanden der dritten Gruppe im Gegensatz zur ersten und zweiten Gruppe während der Testphase Entnahmefehler. Dieser mangelhafte Wissenstransfer lässt sich durch die geringe Informationsbereitstellung begründen. Lediglich das SAB und der Trainer, der die Montage vorführte und erläuterte, standen der dritten Gruppe während des Trainings zur Verfügung. Im Gegensatz dazu nutzten die erste Gruppe multimodale In-situ Informationen und die zweite Gruppe detailreiche Bilder, um das Training zu absolvieren. Dadurch konnte mehr Wissen vermittelt werden, was sich schließlich in der Testphase zeigte.

Die Ergebnisse der Subskalen des NASA-TLX zeigten, dass die mentale Beanspruchung (MD) der Versuchsteilnehmer der dritten Gruppe signifikant höher war als die der ersten Gruppe. Begründen lässt sich dieses Ergebnis dadurch, dass die Probanden die Montage des Motors nur mit Hilfe des SABs und des Trainers bewältigten. Dazu war eine hohe geistige Anstrengung erforderlich, um die korrekten Teile zu entnehmen und diese an die vorgegebenen Positionen zu montieren. Dies hatte auch Auswirkungen auf die Absolvierungsdauer der Testphase (IRCT). Die dritte Gruppe benötigte 6,34% länger als die erste Gruppe und 24,32% länger als die zweite Gruppe, um die Testphase zu absolvieren. Zusätzlich dazu erhöhte sich auch die Fehlerquote (z.B. Reihenfolgefehler – SM), was unter anderem darauf zurückzuführen ist, dass die Probanden aufgrund der mentalen Belastung weniger freie kognitive Ressourcen zur Verfügung hatten, um sich ausreichendes Wissen für eine fehlerfreie Absolvierung der Testphase anzueignen. Neben der mentalen Beanspruchung wurden signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Gruppen für die Messgröße P ermittelt, welche Auskunft über die Selbsteinschätzung der Versuchsteilnehmer liefert. Demnach schätzte die dritte Gruppe ihre Leistung signifikant schlechter ein als die erste Gruppe. Diese Einschätzung ist in Anbetracht der deskriptiven Statistik der Effektivitätsmessgrößen (vgl. Tabelle 30) nachvollziehbar, da die dritte Gruppe die Testphase nachweislich (quantitativ) schlechter absolvierte als die erste Gruppe.

Die Ergebnisse des UEQs verdeutlichen, dass alle drei Anlernkonzepte eine hohe pragmatische Qualität ($P > 2,00$; Max = 3,00; Min = -3,00) besitzen und zwischen den Gruppen keine signifikanten Mittelwertunterschiede vorliegen. Demnach sind alle drei Anlernkonzepte (HMD-basierte Trainingsanwendung, Papieranleitung, Trainer) lösungsorientiert und unterstützen eine Person beim Erlernen einer neuen Montageprozedur. Diese Bewertung stimmt weitestgehend mit den quantitativen Ergebnissen dieser summativen Evaluation überein, denn grundsätzlich waren alle drei Gruppen in der Lage, die vorgegebene Arbeitsaufgabe (Motormontage) mit den ihnen zur Verfügung gestellten Hilfsmitteln zu bewältigen und diese im Anschluss ohne Unterstützung mit geringfügigen Fehlern zu wiederholen. Im Gegensatz zur PQ bestehen signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen für die Messgröße der hedonischen Qualität. Diese war für die HMD-basierte Trainingsanwendung signifikant höher als die der Papieranleitung und die des Trainer-basierten Anlernkonzepts. Die Auswertung der gegensätzlichen Wortpaare (Items) lieferte dazu genauere Erkenntnisse. Demnach empfanden die Probanden das Training mit einer Papieranleitung als langweilig, herkömmlich und konventionell, wohingegen die HMD-basierte Trainingsanwendung als besonders originell, neuartig und spannend wahrgenommen wurde. Das ist eine wichtige Erkenntnis und bietet

Unternehmen die Möglichkeit, AR-Technologien zu etablieren, um attraktive Arbeitsplätze mit neuartigen, innovativen Anlernmethoden zu schaffen.

Die Ergebnisse der qualitativen Aussagen verdeutlichen die überwiegend sehr positive Bewertung der HMD-basierten Trainingsanwendung. Allerdings gibt es auch Optimierungsbedarfe bei der Gestaltung der Interaktionsmodalitäten. Diese sollten entsprechend den Verbalisierungen der Benutzer natürlicher und intuitiver gestaltet werden. Einen ersten wissenschaftlichen Beitrag dazu liefern Funk et al. [223]. Allerdings ist die Untersuchung industrietauglicher Interaktionsmodalitäten für HMDs derzeit unzureichend, wodurch sich ein interessantes weiterführendes Forschungsfeld öffnet. Zusätzlich dazu sollten weitere Tracking-Technologien, wie das Modell-basierte Tracking, im industriellen Nutzungskontext untersucht werden, um eine korrekte und stabile Überlagerung der virtuellen Inhalte mit den korrespondierenden realen Objekten zu gewährleisten. Darüber hinaus verdeutlichen die Aussagen der Benutzer, dass der Einsatz weiterer HMDs für das Erlernen manueller Montageprozesse untersucht werden sollte. Hierfür empfehlen sich neuere, weiterentwickelte HMDs mit geringerem Gewicht, einem höheren Tragekomfort sowie einem größeren Sichtfeld als das der Microsoft HoloLens.

Die qualitativen Aussagen der Probanden bezüglich der Papieranleitung zeigten, dass die Bildinformationen besonders hilfreich waren, um die Montageschritte zu absolvieren. Allerdings erforderten das genaue Hinsehen, Interpretieren und Übersetzen der Bildinformationen in die Realität eine erhöhte geistige Anstrengung der Probanden. Sie lässt sich den Ergebnissen des NASA-TLX zufolge reduzieren, wenn Informationen, wie bei der HMD-basierten Trainingsanwendung, am unmittelbaren Ort visualisiert werden. Darüber hinaus äußerten die Probanden, dass die Papieranleitung unpraktisch ist, da sie kein freihändiges Arbeiten erlaubt. Demzufolge sollten auch keine Hand-held Devices für manuelle Montagefähigkeiten verwendet werden (vgl. Tabelle 1).

Die qualitativen Aussagen der dritten Gruppe zeigen, dass die Unterstützung und Zusammenarbeit mit einem Menschen (Trainer) von den befragten Personen besonders geschätzt werden. Allerdings verdeutlichen die Verbalisierungen auch, dass häufig Sprachbarrieren zwischen dem Trainer und dem Trainee vorliegen. Darüber hinaus schwankt die didaktische Kompetenz der Trainer. Aufgrund dieser Tatsachen wird das Training erschwert. Ein standardisiertes Vorgehen, welches durch die HMD-basierte Trainingsanwendung gegeben ist, kann zukünftig Anwendung in der manuellen Montage finden und dadurch das Anlernen vereinheitlichen und vereinfachen.

5.6.6 Zusammenfassung der summativen Evaluation

Im Rahmen dieser abschließenden summativen Evaluation erfolgte der quantitative und qualitative Wirksamkeitsnachweis des zweiten Artefakts dieser Dissertation. Hierzu wurde der Einsatz der HMD-basierten Trainingsanwendung, welche durch die formativen Evaluationen iterativ geformt wurde, an einem industriellen AP und einem realen Anwendungsfall erprobt. Im Vergleich dazu wurden ein Konzept mit einer Papieranleitung, welches häufig für Vergleiche in wissenschaftlichen Beiträgen verwendet wird und das in der Industrie etablierte on-the-job Training evaluiert. Für die Erprobung der drei Konzepte wurde ein between-subject Versuchsdesign mit 45 Versuchsteilnehmern verwendet, welche homogen in drei Gruppen aufgeteilt wurden. Das Experiment gliederte sich in eine Trainingsphase, in der die Probanden die

Inhalte eines Montagetakts mit entsprechender Unterstützung erlernen sollten und eine Testphase, in der die Versuchsteilnehmer aufgefordert wurden, die Montage ohne jegliche Unterstützung zu wiederholen. Währenddessen wurden quantitative Messgrößen zur Bewertung der Effektivität und Effizienz der drei Konzepte erhoben. Zusätzlich dazu wurden die Gruppen im Anschluss mit Hilfe standardisierter Fragebögen und einem teilstrukturierten Interview befragt. Die Ergebnisse dieser abschließenden Evaluation liefern eine Antwort auf die vierte und letzte Forschungsfrage dieser Dissertation:

Welche Zusammenhänge ergeben sich durch die praktische Anwendung des gebrauchstauglichen AR-basierten Trainingssystems im industriellen Nutzungskontext?

Demnach benötigten die Personen, die das Montagetraining mit Unterstützung des HMDs absolvierten, signifikant mehr Zeit zur Absolvierung als die Personen, die das Training mit Hilfe einer Papieranleitung oder einem Trainer absolvierten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Einsatz von AR-basierten Systemen im industriellen Nutzungskontext derzeit mangelhaft und der Umgang mit solchen Systemen völlig neuartig für nahezu alle Personen sind. Die Ergebnisse der Evaluation zeigen allerdings auch, dass der Wissenstransfer der Probanden, die mit dem HMD trainierten, gegenüber den konventionellen Konzepten höher ist. Dieses Resultat verdeutlicht, dass sowohl die sensomotorischen als auch die kognitiven Fähigkeiten der Benutzer durch die Trainingsanwendung gestärkt wurden. Darüber hinaus lässt sich auf Basis der Ergebnisse der Fragebögen und den qualitativen Aussagen der Probanden abschließend festhalten, dass die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte HMD-basierte Trainingsanwendung eine optimale Unterstützung für das Erlernen manueller Montagetätigkeiten bietet. Dadurch kann die Anwesenheit eines Trainers reduziert und Kosten können eingespart werden. Allerdings sollte der Trainer nicht substituiert werden, da die qualitativen Probandenaussagen gezeigt haben, dass die Anwesenheit und Unterstützung durch einen Trainer sehr geschätzt wird. Folglich empfiehlt sich ein hybrides Anlernkonzept, das zukünftig wie folgt gestaltet werden könnte:

- **Offline-Training:** Im ersten Schritt erfolgt ein nicht-taktgebundenes Training abseits der Fließbandproduktion mit Hilfe der HMD-basierten Trainingswendung an einem AP, welcher den Gegebenheiten in der Produktion entspricht. Dadurch wird die Übertragbarkeit auf die Produktionslinie gewährleistet und die sensomotorischen und kognitiven Fähigkeiten der Benutzer gestärkt.
- **Inline-Training:** Im zweiten Schritt erfolgt ein taktgebundenes Training in der laufenden Produktionslinie ohne das HMD. In dieser Phase unterstützen der Trainer und die bereits vorhandenen Hilfsmittel (z.B. ein Bildschirm mit Anweisungen) bei der Bewältigung der Montageschritte. Zusätzlich sollte eine detailreiche Papieranleitung mit Bild- und Textinhalten an dem AP installiert werden, so dass der Trainee bei Bedarf nachschlagen kann.

Durch die Kombination eines Offline- und Inline-Trainings können die Vorteile der verschiedenen Anlernkonzepte kombiniert werden. Somit lässt sich die Qualität des Trainings und die Motivation der Trainees zukünftig steigern. Außerdem kann durch das vorgelagerte Offline-Training die Zeit des Inline-Trainings reduziert werden. Dadurch verringert sich der Stress, welcher bei den Personen durch die Taktzeitvorgabe

entsteht (vgl. Tabelle 18). Zudem sinkt das Fehlrisiko im Inline-Training, da die Trainees bereits ausreichende Fähigkeiten im Offline-Training erworben haben und lediglich lernen müssen, die erlernten Montageschritte unter einer bestimmten Zeitvorgabe auszuführen.

5.7 Empfehlungen

Auf Basis der Erfahrungen, die im Rahmen dieser Dissertation durch die iterative Entwicklung der HMD-basierten Trainingssoftware und die Anwendung wissenschaftlicher Methoden im industriellen Nutzungskontext gesammelt wurden, werden in diesem Abschnitt verschiedene Empfehlungen dargelegt. Sie stellen das dritte und letzte Artefakt (vgl. Abbildung 6) dieser Dissertation dar. Die nachfolgenden Unterabschnitte geben Auskunft über allgemeine, methodische und gestalterische Empfehlungen.

5.7.1 Allgemeine Empfehlungen

Eine grundlegende Voraussetzung für die erfolgreiche Gestaltung und Evaluation einer HMD-basierten Trainingsanwendung ist **Interdisziplinarität**. Dazu ist ein Forscher mit umfangreichem Wissen in verschiedenen Disziplinen oder ein cross-funktionales Forschungsteam notwendig [21]. Dieses muss in der Lage sein, Evaluationen zu planen, durchzuführen und auszuwerten. Bei der Versuchsdurchführung sollten Aufgaben im Team sinnvoll aufgeteilt werden. Dabei hat sich gezeigt, dass zwei bis drei Evaluatoren ausreichend sind, um verschiedene qualitative und quantitative Messgrößen zu erheben. Die Auswertung der ermittelten Daten erfordert sowohl Kenntnisse auf dem Gebiet der Transkription und der qualitativen Datenanalyse als auch auf dem Gebiet der Statistik, welche zur Auswertung der quantitativen Daten notwendig sind. Hierfür empfiehlt es sich, die Software IBM SPSS Statistics und die Methodenberatung der Universität Zürich [224] zu verwenden. Neben den Evaluationskenntnissen sollte der Forscher bzw. das Forschungsteam Erfahrungen mit Entwicklungsumgebungen (z.B. Unity), mit Software zur 3D-Modellierung (z.B. Blender) und mit Bildbearbeitungsprogrammen (z.B. Adobe Photoshop) haben. Diese Softwarekenntnisse sind notwendig, um high-fidelity AR-Anwendungen mit hochwertigen und animierten 2D und 3D Inhalten zu generieren.

Eine weitere allgemeine Empfehlung basiert auf den Erkenntnissen der strukturierten Literaturrecherche (vgl. Abschnitt 3.3.4) und den Erfahrungen aus mehreren Expertendiskussionen während der Teilnahme an zahlreichen wissenschaftlichen Veranstaltungen (z.B. Konferenzteilnahmen). Demnach hat sich gezeigt, dass **Forschungskooperationen** zwischen wissenschaftlichen Einrichtungen und der Industrie im Bereich AR mangelhaft sind. Dadurch fehlen zum Teil grundlegende wissenschaftliche Kenntnisse im industriellen Bereich. Diese Limitation könnte geschlossen werden, wenn Unternehmen den Einsatz von AR-Technologien erforschen und die Erkenntnisse auf wissenschaftlichen Datenbanken publizieren oder Kooperationsprojekte mit Forschungseinrichtungen initiieren würden. Einen ersten Beitrag zum Einsatz von HMDs im industriellen Nutzungskontext liefert diese Dissertation. Weitere Untersuchungen sollten erfolgen, um einen Reifegrad [225] zu erreichen, der den Produktiveinsatz dieser Technologie in verschiedenen Anwendungsdomänen sicherstellt. Mögliche Stoßrichtungen werden im Abschnitt 6.4 dargelegt.

5.7.2 Methodische Empfehlungen

Das Vorgehen zur Gestaltung und Entwicklung der HMD-basierten Trainingsanwendung orientierte sich am menschenzentrierten Entwicklungsprozess der DIN EN ISO 9241-210: 2010 (vgl. Abbildung 15). Dieser besteht aus den drei Phasen: Nutzungskontext- und Anforderungsanalyse, Gestaltung sowie Evaluation, welche repetitiv angewendet werden. Für die drei Phasen wurden im Kapitel 4 geeignete Methoden und Gestaltungsempfehlungen ausgewählt, begründet und zu einem Vorgehensmodell zusammengefasst. Durch dessen Anwendung im Kapitel 5 wurde die Nützlichkeit überprüft und ein Trainingssystem instanziiert, welches die Benutzer beim Erlernen manueller Montagetätigkeiten unterstützt. Auf Basis der Erfahrungen, die durch die Anwendung des Vorgehensmodells gesammelt wurden, werden in diesem Unterabschnitt methodische Empfehlungen dargelegt.

Bei der Anwendung der Methodik zur Nutzungskontext- und Anforderungsanalyse (vgl. Abbildung 16) hat sich zunächst gezeigt, dass die ausgewählten Analysemethoden ausreichend detaillierte Ergebnisse lieferten (vgl. Abschnitt 5.1), sodass keine Optimierungen bzw. Anpassungen der Methoden notwendig sind. Als besonders wertig hat sich die **aktive Teilnahme im Forschungsfeld** erwiesen. Dabei begeben sich der Forscher bzw. das Forschungsteam in die Anwendungsdomäne und absolvieren typische Arbeitsaufgaben der Zielgruppe. Somit ergeben sich wichtige und umfangreiche Erkenntnisse zum Nutzungskontext. Darüber hinaus können erste Anforderungen und Bedürfnisse aus Sicht der potentiellen Nutzer abgeleitet werden. Dies ermöglicht schließlich die Gestaltung gebrauchstauglicher Assistenzsysteme.

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass Automobilunternehmen HMD-basierte Industrieanwendungen in der Regel von externen Dienstleistern bzw. Start-up-Unternehmen entwickeln lassen. Dies führt dazu, dass die Anwendungen oft nicht gebrauchstauglich sind, da den fremden Unternehmen Kontext- und Nutzerverständnis fehlen, welche essentiell für die Gestaltung anwenderfreundlicher Lösungen sind. Darüber hinaus entstehen hohe Entwicklungskosten, weil die Softwareanpassungen bzw. Optimierungen nicht selbstständig durchgeführt werden können. Daher sollte die Gestaltung HMD-basierter Industrieanwendungen **inhouse** erfolgen. Um dies zu gewährleisten, muss der Forscher bzw. das Forschungsteam die notwendigen Kompetenzen besitzen, die im Abschnitt 5.7.1 aufgezeigt wurden. Vor der ersten Evaluation des prototypischen Systems empfiehlt es sich, die Funktionalitäten und Interaktionsmodalitäten so weit zu entwickeln, dass sie für einen Benutzer erlebbar sind (**high-fidelity Prototyp**). Dabei sollte das System bei der Absolvierung einer Arbeitsaufgabe unterstützen und ein ausgereiftes Design besitzen. Dies hat sich im industriellen Nutzungskontext als sehr nützlich erwiesen, da bereits ein positiver Ersteindruck bei dem Benutzer entsteht und die Technologieakzeptanz steigert. Somit erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass das System zukünftig Anwendung findet.

Die Evaluationsmethodik des Vorgehensmodells (vgl. Abbildung 21) hat sich im Rahmen der drei formativen Evaluationen und der summativen Evaluation als nützlich erwiesen, da umfangreiche wissenschaftliche Erkenntnisse gesammelt werden konnten und das System systematisch optimiert wurde. Es hat sich gezeigt, dass eine HMD-basierte Trainingsanwendung mit Hilfe **standardisierter, technologieunabhängiger Fragebögen**, wie der SUS, dem NASA-TLX, dem AttrakDiff und dem UEQ, bewertet werden kann und aussagekräftige Ergebnisse liefert. Allerdings zeigten die Erfahrungen der Evaluation auch, dass

Papierfragebögen aufgrund des Datenschutzes und der Möglichkeiten zur Datenanalyse gegenüber digitalen Fragebögen zu bevorzugen sind. Daher empfiehlt sich die Verwendung des UEQs adversativ dem AttrakDiff. Darüber hinaus sollten **handschriftliche Gesprächs- und Observationsprotokolle** verwendet werden, um eine schnelle Systemneugestaltung innerhalb der formativen Evaluationsphase zu gewährleisten. Die daraus resultierenden Erkenntnisse sind ausreichend und können unmittelbar nach Beendigung einer Versuchsreihe verwendet werden, um das System zu optimieren. Daraus ergibt sich ein Effizienzvorteil gegenüber der zeitlich aufwändigen Transkription und Analyse der qualitativen Daten. Die Erfahrungen aus der zweiten formativen Evaluation haben zudem gezeigt, dass Expertenevaluationen kostenintensiv und nicht zwingend notwendig sind, um die Gebrauchstauglichkeit einer HMD-basierten Anwendung zu bewerten. Besser eignen sich die Erprobungen mit potentiellen Nutzern, um ausreichend viele Informationen für eine Systemoptimierung zu sammeln. Dabei stellen **technische Auszubildende** die idealen Versuchsteilnehmer für die Evaluationen dar. Sie sind in der Lage, eine unbekannte komplexe Arbeitsaufgabe (z.B. Motormontage) mit einem HMD in einer ähnlichen Zeit und Qualität wie erfahrene Montaguearbeiter zu bewältigen und hinreichend viele Systemschwachstellen zu identifizieren. Darüber hinaus sind sie für ein Automobilunternehmen leicht verfügbar und kostengünstiger als taktgebundene Montaguearbeiter, die für einen Versuch außerhalb der Produktionslinie durch einen Springer ersetzt werden müssen.

5.7.3 Gestaltungsempfehlungen

Basierend auf den Erfahrungen, die im Rahmen der verschiedenen Systemevaluationen gesammelt wurden, werden in diesem Unterabschnitt verschiedene Gestaltungsempfehlungen präsentiert [218]. Sie beziehen sich auf die Trainingssoftware und sind unabhängig vom Anzeigegerät (HMD, Hand-held, Projektion) nutzbar. Dadurch können sie von anderen Wissenschaftlern verwendet werden, um gebrauchstaugliche AR-Anwendungen zu gestalten.

Eine **einfache Gestaltung** mit verständlichen und konsistenten Informationen sollte bei der Entwicklung der Software berücksichtigt werden. Gestalterische Elemente mit geringer Komplexität und einheitlichen Farben reduzieren die kognitive Belastung der Benutzer, wodurch der Wissenstransfer gesteigert werden kann. Im Gegensatz dazu führen augmentierte Informationen, die eine hohe visuelle Komplexität besitzen, zu einer Steigerung der Hirnaktivitäten. Dadurch nimmt die kognitive Belastung zu und das prozedurale Gedächtnis der Benutzer wird beeinträchtigt.

Die Anleitung eines Benutzers mit reinen Schritt-für-Schritt Informationen reduziert die initiale Durchführungsdauer einer prozeduralen Tätigkeit. Allerdings wirkt sich diese Art der Informationsbereitstellung negativ auf den Wissenstransfer aus. Es empfiehlt sich daher, dem Benutzer die **Kontrolle** über die Software zu geben, sodass er selbstständig entscheiden kann, welche Informationen visualisiert werden. Darüber hinaus sollte die Person mittels einfacher Interaktionsmodalitäten in der Lage sein, zwischen den verschiedenen Schritten zu wechseln.

Damit eine Person eine prozedurale Tätigkeit uneingeschränkt ausführen kann, müssen ihre Hände frei sein. Dies erfordert HMD-basierte Anwendungen, welche per **Sprachsteuerung** kontrollierbar sind. Hierdurch können Benutzer sowohl Teile und Werkzeuge handhaben als auch mit dem Assistenzsystem

interagieren. Die Sprachbefehle sollten dabei einfach sein und auf ein Minimum reduziert werden, um eine unkomplizierte Handhabung der Software zu gewährleisten und die kognitive Belastung des Benutzers zu reduzieren.

Alltägliche interaktive Systeme, wie beispielsweise die Bedienoberfläche eines Fahrstuhls, geben einem Benutzer bei Interaktion ein **multimodales Feedback**. Die Adaption solcher vertrauter Feedbackmodalitäten kann die Akzeptanz von AR-Technologien bei neuen Benutzern steigern und die Eingewöhnungszeit verkürzen. Darüber hinaus kann eine Kombination aus visuellem, auditivem und ggfs. taktilen Feedback dazu beitragen, den Wissenstransfer zu erhöhen, da verschiedene menschliche Informationskanäle angesprochen werden.

Die Software sollte **verschiedene Benutzermodi** besitzen, um sowohl Anfängern als auch Experten die Verwendung zu ermöglichen. Das erfordert die Bereitstellung von unterschiedlichen Informationsmengen. Während ein Anfänger viele Informationen benötigt, um eine Arbeitsaufgabe erfolgreich abzuschließen, sollte ein Experte nicht mit zu vielen Informationen versorgt werden, da es zu einer Steigerung seiner Frustration führt. Auf Basis der Erfahrungen aus den Evaluationen empfiehlt es sich daher, vier verschiedene Benutzermodi (Einführung, Anfänger, Fortgeschritten und Experte) zu verwenden und die Informationen, welche die Person am stärksten anleiten, sukzessive zu reduzieren.

Bei der Gestaltung einer Trainingssoftware sollten **Kontextinformationen** berücksichtigt werden, um den Aufbau eines mentalen Modells zu steigern. Dieses ist für die fehlerfreie Wiederholung einer erlernten prozeduralen Tätigkeit notwendig. Hierfür haben sich besonders Fortschrittsanzeigen als nützlich erwiesen. Diese sollten für Videoinstruktionen verwendet werden, um dem Benutzer die Dauer eines Videos zu verdeutlichen. Darüber hinaus können sie genutzt werden, um den Prozessfortschritt anzuzeigen. Zusätzlich dazu empfiehlt sich die Verwendung eines Prozessüberblicks, der dem Benutzer verdeutlicht, welche Schritte absolviert wurden und welche noch zu erledigen sind.

Die Ergebnisse der Evaluationen haben gezeigt, dass **Gamification-Elemente** als besonders motivierend, innovativ und kreativ wahrgenommen werden. Daher empfiehlt sich deren Verwendung bei AR-basierten Trainingsanwendungen im industriellen Nutzungskontext. Realisiert werden kann dies über ein futuristisches Softwaredesign (vgl. Abbildung 25), animierte 3D-Charaktere (vgl. Abbildung 27) und Konzepte, die den Benutzer an ein Spiel erinnern (vgl. Abbildung 40). Dadurch lassen sich die Motivation und das Engagement eines Benutzers steigern, was schließlich zu einer Verbesserung des Trainingseffekts führt.

Die Verwendung von **multimodalen Informationen** ist aufgrund individueller Benutzerpräferenzen sehr sinnvoll. Demnach bevorzugen einige Personen traditionelle Medien, wie beispielsweise Video- oder Textinformationen, um sich neues Wissen anzueignen. Andere wiederum präferieren augmentierte In-situ 3D-Lerninhalte, die mittels eines HMDs dargestellt werden können und das räumliche Verständnis eines Benutzers fördern (Erlernen der Orientierung und der korrekten Position eines Objekts). Dabei sollte beachtet werden, dass die Überlagerung eines virtuellen Objekts mit dem korrespondierenden realen Objekt nicht zu stark ist, da der Benutzer sonst in seiner Tätigkeitsausführung eingeschränkt wird. Es empfiehlt sich

daher die Verwendung von Außenkonturdarstellungen (Outline Shader) oder adaptiv transparenten Visualisierungen, welche in Abhängigkeit zur Position des Benutzers intransparent oder transparent visualisiert werden. Dabei gilt, je näher die Person sich an dem augmentierten virtuellen Objekt befindet, desto transparenter sollte es visualisiert sein und umgekehrt. Bei der Bereitstellung der multimodalen Informationen ist darauf zu achten, dass diese nicht simultan erfolgt, um die visuelle Ablenkung und Belastung zu minimieren. Vielmehr sollten die Informationen nach den individuellen Bedürfnissen des Benutzers abrufbar sein.

Eine **Schichtenarchitektur** (engl. multilayered architecture) sollte für den Aufbau der Bedienoberfläche verwendet werden, da sie ein vertrautes Strukturprinzip für viele Personen darstellt. Demnach verfügt jede Schicht über unterschiedliche Funktionen und Informationen. Für die Gestaltung einer HMD-basierten Anwendung empfiehlt sich die permanente Visualisierung einer virtuellen Bedienoberfläche. Diese sollte ortsunveränderlich im realen Raum, vorzugsweise am Ort der Tätigkeitsausführung, positioniert werden und den Benutzer nicht beeinträchtigen. Informationen, welche über die Bedienoberfläche abrufbar sind, sollten unsichtbar in Unterschichten angeordnet werden und nur auf Abruf des Benutzers sichtbar sein.

5.8 Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel erfolgte die Anwendung der verschiedenen Methoden und Empfehlungen des Vorgehensmodells (vgl. Abbildung 22). Dabei wurden zunächst der Nutzungskontext analysiert und die Anforderungen (funktional und nicht-funktional) potentieller Benutzer an die Gestaltung eines AR-basierten Trainingssystems erhoben. Auf deren Basis sowie den verschiedenen Empfehlungen aus der Literatur (vgl. Abschnitt 3.3.2 & Abschnitt 4.3) wurde das zweite Artefakt dieser Dissertation iterativ gestaltet und somit eine Antwort auf die dritte Forschungsfrage geliefert (vgl. Abschnitt 1.2). Dabei handelt es sich um eine spielerische multimodale HMD-basierte Trainingsanwendung mit futuristischem Design, die über verschiedene Schwierigkeitslevel verfügt, sodass sie sowohl Anfänger als auch Experten effektiv, effizient und zufriedenstellend beim Erlernen manueller Montagetätigkeiten unterstützt. Im Rahmen drei formativer Evaluationen, die als Fallstudien an einem industriellen AP und einer beispielhaften prozeduralen Arbeitsaufgabe (Montagetätigkeit) durchgeführt wurden, wurde die Trainingsanwendung systematisch weiterentwickelt. Dabei erfolgte die erste Evaluation in einem sehr frühen Entwicklungsstadium mit wenigen Probanden. Aus diesen initialen Ergebnissen ging hervor, dass die Software bereits über ein ausgereiftes Design und weit entwickelte Funktionalitäten verfügte. Allerdings konnten auch Schwachstellen identifiziert werden, welche die Grundlage für erste Optimierungen bildeten. Die angepasste Trainingsanwendung wurde anschließend einer zweiten formativen Evaluation unterzogen. Dabei testeten potentielle Benutzer, AR-Experten sowie Büroangestellte die HMD-basierte Software in vollständigem Umfang und absolvierten mit dieser vier Montagetrainingsdurchgänge. Im Anschluss daran erfolgte ein Test zur Überprüfung des Wissenstransfers. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass alle Versuchsteilnehmer während der Absolvierung der Trainingsdurchläufe optimal durch das Trainingssystem unterstützt wurden und sich die Montagezeit mit zunehmender Nutzungsdauer systematisch verringerte. Zudem verdeutlichen die Ergebnisse der Testphase, dass die Probanden in der Lage waren, den Motor ohne jegliche Unterstützung zu montieren. Allerdings traten Reihenfolgefehler auf, was auf eine mangelnde Berücksichtigung einer passiven Lernphase zurückzuführen ist. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse, den qualitativen Nutzeraussagen

sowie den Ergebnissen verschiedener standardisierter Fragebögen wurde die Trainingsanwendung erneut optimiert und einer weiteren formativen Evaluation mit 30 Versuchsteilnehmern unterzogen. Die Resultate weisen darauf hin, dass die Benutzer sowohl in der Lage waren, den Motor mit Hilfe der optimierten Software erfolgreich zu montieren als auch die Montageprozedur ohne jegliche Unterstützung nahezu fehlerfrei zu wiederholen. Demnach wurden die sensomotorischen und kognitiven Fähigkeiten der Benutzer durch die Trainingsanwendung optimal trainiert. Nach Abschluss der dritten formativen Evaluation erfolgten keine weiteren Optimierungen. Das finale gebrauchstaugliche System wurde einer abschließenden summativen Evaluation unterzogen und im Vergleich zu zwei traditionellen Anlernkonzepten (Papierbasiert, Trainer-basiert) mit insgesamt 45 Probanden erprobt, wodurch die vierte und letzte Forschungsfrage beantwortet wurde (vgl. 1.2). Dabei hat sich gezeigt, dass der Wissenstransfer der Probanden durch die Verwendung der multimodalen HMD-basierten Trainingsanwendung im Vergleich zu den herkömmlichen Anlernkonzepten signifikant höher ist. Allerdings benötigten die Probanden mehr Zeit zur Absolvierung des Trainings, was auf die neuartigen Interaktionsmodalitäten und die augmentierte Informationsbereitstellung zurückzuführen ist. Zusätzlich dazu verdeutlichen die qualitativen Aussagen und die Erkenntnisse der verschiedenen Fragebögen (SUS, UEQ, NASA-TLX) die Zufriedenheit der Benutzer mit dem System. Zum Abschluss dieses Kapitels wurden, basierend auf den Erkenntnissen und Erfahrungen aus den verschiedenen Evaluationen, Empfehlungen dargelegt, welche von anderen Wissenschaftlern genutzt werden können, um weitere gebrauchstaugliche AR-basierte Trainingsanwendungen im industriellen Nutzungskontext zu instanzieren.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Anforderungen der Anwendungsdomäne (Tabelle 11) durch die Anwendung des Vorgehensmodells mit den identifizierten Methoden und Gestaltungsempfehlungen erfüllt wurden. Dabei konnte mit Hilfe eines menschenzentrierten Entwicklungsvorgehens eine gebrauchstaugliche HMD-basierte Trainingsanwendung für manuelle Montageprozesse im industriellen Nutzungskontext gestaltet sowie evaluiert werden, wodurch weitere Empfehlungen abgeleitet wurden. Folglich lässt sich die Nützlichkeit der drei Artefakte dieser Dissertation bestätigen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

„Man merkt nie, was schon getan wurde, man sieht immer nur, was noch zu tun bleibt.“

Marie Curie, Physikerin

Die Automobilindustrie befindet sich infolge des wachsenden Wettbewerbsdrucks, steigender Kundenwünsche und politischer Regularien in einem bedeutsamen Wandel. Um auch zukünftig international wettbewerbsfähig zu sein und die Anforderungen diverser Stakeholder zu decken, werden zunehmend mehr Fahrzeugmodelle und Varianten gefertigt. Dadurch kommt es zu einer Komplexitätssteigerung in der Produktion, insbesondere bei manuellen Montageprozessen, welche dazu führt, dass Personen eine umfangreiche Qualifizierung benötigen, um die komplexen Prozesse zu beherrschen. Im Zuge dessen halten innovative Technologien, wie AR-basierte Trainingssysteme, Einzug in die Industrie. Mit diesen lassen sich virtuelle, multimodale, kontextbezogene und interaktive Echtzeitinformationen im dreidimensionalen realen Raum mittels Hand-held Devices, HMDs oder Projektoren darstellen. Basierend auf einer limitierten Anzahl wissenschaftlicher Untersuchungen, verspricht deren Einsatz eine Effektivitäts- und Effizienzsteigerung prozeduraler Anlernprozesse. Während die bisherige Forschung im Laborkontext erfolgte, fehlt es an umfangreichen Erkenntnissen im industriellen Nutzungskontext. Dadurch mangelt es an praxistauglichen reproduzierbaren Vorgehensmodellen zur Gestaltung und Evaluation AR-basierter Trainingssysteme, welche ihre Anwendbarkeit durch eindeutige Methodenempfehlungen sicherstellen. Diese sind allerdings zwingend erforderlich, um gebrauchstaugliche Assistenzsysteme zu gestalten. Mit dem Ziel diese Forschungslücken zu schließen, wurden vier aufeinanderfolgende Forschungsfragen formuliert und im Verlauf dieser Dissertation beantwortet. Die daraus resultierenden wissenschaftlichen und praxisbezogenen Beiträge werden in den nachfolgenden Abschnitten zusammengefasst beschrieben. Ergänzend dazu liefern weitere Forschungsbedarfe sowie ein abschließender, in die Zukunft gerichteter Ausblick wertvolle Ansätze für angehende Forschungsprojekte.

6.1 Zusammenfassung des wissenschaftlichen Beitrags

Den Ausgangspunkt dieser Dissertation bildete eine umfangreiche strukturierte Literaturrecherche. Im Rahmen dieser wurden zunächst relevante Beiträge verschiedener Anwendungsdomänen identifiziert, welche sich der Erforschung AR-basierter Trainingssysteme widmen. Diese bieten die Möglichkeit für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen, wie beispielsweise im militärischen Bereich. Durch die nähere Analyse der Publikationen im Kontext der manuellen Montage konnten relevante Forschungslücken im Forschungsfeld dieser Arbeit aufgedeckt werden. Basierend auf diesen wurden Fokusgruppendifkussionen mit relevanten Stakeholdern der Anwendungsdomäne durchgeführt, um praxisrelevante Anforderungen an die Erarbeitung eines Gestaltungskonzepts für AR-basiertes Montagetraining zu ermitteln. Um die wissenschaftlichen Limitationen zu schließen und die Praxisanforderungen zu erfüllen, wurde zunächst ein menschenzentriertes Vorgehensmodell zur Gestaltung AR-basierter Trainingssysteme entwickelt, welches sich an dem Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme der DIN EN ISO 9241-210:2010 orientiert. Um die reproduzierbare Verwendung des Modells sicherzustellen, wurden

verschiedene Methoden und Empfehlungen innerhalb der drei Ablaufphasen, Nutzungskontext- und Anforderungsanalyse, Gestaltung, Evaluation, dargelegt und hinsichtlich eines ressourcenschonenden Einsatzes ausgewählt. Die Anwendung der selektierten Methoden lieferte zunächst detaillierte Kontextinformationen einer ausgewählten Motormontagelinie sowie funktionale und nicht-funktionale Anforderungen potentieller Systemnutzer. Basierend auf diesen umfangreichen Erkenntnissen sowie den vorhandenen Gestaltungsempfehlungen aus der wissenschaftlichen Literatur, wurde ein kabelloses AR-basiertes OST-HMD ausgewählt und eine multimodale, spielerische Trainingssoftware mit futuristischem Design gestaltet. Diese wurde im Rahmen iterativer Evaluationen an einem nicht-taktgebundenen industriellen Montagearbeitsplatz erprobt und durch systematische Optimierungen zu einer gebrauchstauglichen HMD-basierten Trainingsanwendung weiterentwickelt. Abschließend wurde deren Nützlichkeit mit Hilfe einer summarischen Evaluation im Vergleich zu zwei herkömmlichen Anlernkonzepten überprüft. Die daraus resultierenden Erkenntnisse erweitern die bestehende Wissensbasis und bestätigen die Eignung der ausgewählten Methoden und Gestaltungsempfehlungen im industriellen Nutzungskontext. Auf Grundlage der gesammelten Erfahrungen, die aus der Anwendung des Vorgehensmodells resultieren, wurden abschließend verschiedene Empfehlungen dargelegt. Sie geben anderen Wissenschaftlern die Möglichkeit, weitere gebrauchstaugliche AR-basierte Trainingssysteme im industriellen Nutzungskontext erfolgreich zu gestalten.

6.2 Zusammenfassung des praxisbezogenen Beitrags

Der praxisbezogene Beitrag dieser Dissertation resultiert aus der stringenten Anwendung der verschiedenen wissenschaftlichen Methoden und Empfehlungen des erarbeiteten Vorgehensmodells, wodurch ein AR-basiertes Trainingssystem für manuelle Montagetätigkeiten instanziiert wurde. Basierend auf einigen wissenschaftlichen Empfehlungen und den Anforderungen der Anwendungsdomäne, wurde zunächst eine geeignete Hardware ausgewählt. Demnach diente die Microsoft HoloLens als Anzeigegerät zur Visualisierung der augmentierten Informationen. Auf Grundlage dieses HMDs wurde eine gebrauchstaugliche Trainingsanwendung entwickelt. Diese Software zielt darauf ab, die sensomotorischen und kognitiven Fähigkeiten eines Benutzers ausreichend zu stärken, um die wiederholte Ausführung einer erlernten prozeduralen Tätigkeit ohne unterstützendes Assistenzsystem zu gewährleisten. Hierzu dienen multimodale audiovisuelle Informationen, welche über verschiedene Trainingslevel hinweg sukzessive reduziert werden. Dadurch kann die Software sowohl von Anfängern als auch von Experten genutzt werden. Verschiedene Gamification-Elemente, wie ein futuristisches Design und ein animierter 3D-Charakter, tragen zudem zur Motivationssteigerung bei. Darüber hinaus sorgen visuelle Strukturinformationen, wie Fortschrittsbalken und eine Prozessübersicht, für den Aufbau eines mentalen Modells, wodurch die prozeduralen Fähigkeiten eines Benutzers gestärkt werden.

Durch eine empirische Systemevaluation konnte nachgewiesen werden, dass Personen ohne Vorerfahrungen in der Lage waren, eine komplexe Motormontagetätigkeit lediglich mit Hilfe der HMD-basierten Trainingsanwendung zu absolvieren, zu erlernen und diese ohne jegliche Unterstützung effektiv sowie effizient zu wiederholen. Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse verschiedener standardisierter wis-

senschaftlicher Fragebögen und qualitative Aussagen die Zufriedenheit der Benutzer mit dem Trainingssystem. Dementsprechend kann die Aussage von Büttner et al. [226] , „HMDs sind als Assistenzsysteme für Montagetätigkeiten ungeeignet“, negiert werden.

6.3 Weiterer Forschungsbedarf

Der weitere Forschungsbedarf resultiert aus den Limitationen der vorliegenden Dissertation. Demnach wurde das Forschungsfeld bereits zu Beginn dieser Arbeit stark auf die industrielle Anwendungsdomäne eingeschränkt und relevante Forschungslücken im Kontext des AR-basierten Montagetrainings bearbeitet. Ergänzende Untersuchungen in anderen Domänen (z.B. Medizin, Militär, Unterhaltungsbranche) könnten zusätzliche interessante wissenschaftliche Erkenntnisse liefern. Darüber hinaus sollte der Einsatz aktuell verfügbarer HMDs (z.B. HoloLens 2, Magic Leap One, ODG R-9) im industriellen Nutzungskontext näher untersucht werden. Diese bieten inzwischen aufgrund des technologischen Fortschritts und der damit einhergehenden Optimierung der Prozessorleistung, der Displayauflösung, des Gewichts sowie des Sichtfelds gewisse Vorteile gegenüber der Microsoft HoloLens. Außerdem könnte die Exploration der folgenden Forschungsfrage, die aus den qualitativen Nutzeraussagen der summativen Evaluation (vgl. Abschnitt 5.6.5) abgeleitet wurde, relevante Erkenntnisse für die Wissenschaft und die Industrie liefern:

- Wie muss eine gebrauchstaugliche HMD-basierte Interaktionsmodalität für manuelle Montageprozesse im industriellen Nutzungskontext gestaltet werden?

Diesbezüglich geben Lee und Hui [227] einen guten Überblick potentieller Interaktionsmodalitäten, welche als Ausgangsbasis für weiterführende Untersuchungen herangezogen werden können. Neben den bereits genannten Forschungsbedarfen ergeben sich weitere Potentiale aus den Einschränkungen der umfangreichen Evaluationen dieser Arbeit. Demnach sollten für statistische Vergleiche eine höhere Anzahl an Versuchsteilnehmern verwendet werden, um normalverteilte Datensätze zu gewährleisten und signifikante Gruppenunterschiede zu identifizieren. Zusätzlich dazu empfiehlt sich die Erforschung von möglichen Unterschieden zwischen jungen und älteren Probanden, von Langzeittrainingseffekten durch augmentierte multimodale Informationen sowie von ergonomischen Auswirkungen eines HMDs auf den Benutzer beim Langzeiteinsatz (Tragedauer > 7h). Darauf beziehungsweise stellen die Beiträge von Theis et al. [228] und Wille [229] eine interessante Grundlage für mögliche Forschungsprojekte dar.

Basierend auf den Erfahrungen, welche über die letzten drei Jahre gesammelt wurden, ergibt sich eine weitere offene Forschungsfrage:

- Welche Komplexität muss eine prozedurale Tätigkeit haben, dass sich der Einsatz eines AR-basierten Assistenzsystems lohnt?

Für die Erprobung der HMD-basierten Trainingsanwendung wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation eine Motormontagetätigkeit ausgewählt, welche mehr als die doppelte Anzahl an Montageschritten im Vergleich zu dem Anwendungsfall von Webel et al. [65] aufweist. Dadurch ist gewährleistet, dass sie ohne Unterstützung nicht ausführbar ist und erlernt werden muss. Allerdings hat sich in der Praxis gezeigt,

dass Beschlüsse zum Einsatz AR-basierter Assistenzsysteme häufig auf subjektiven Gefühlen entscheidungsberechtigter Personen in einem Unternehmen beruhen. Infolgedessen kommt es zu einer unsachgemäßen Verwendung dieser Systeme, was zu einer mangelnden Akzeptanz der Benutzer führt. Die Beantwortung der zuletzt genannten Forschungsfrage liefert Klarheit und eine wichtige Grundlage für einen sachgerechten Gebrauch von AR-basierten Assistenzsystemen im industriellen Nutzungskontext.

6.4 Ausblick

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die umfangreichen Ergebnisse der vorliegenden Dissertation vorhandene wissenschaftliche Forschungslücken schließen und einen bedeutenden ersten Beitrag zum produktiven Einsatz von HMDs in der Industrie liefern. Mit Hilfe des menschenzentrierten Vorgehensmodells wird es erstmals möglich, auf reproduzierbare Art und Weise einen industriellen Nutzungskontext sowie Nutzeranforderungen zu analysieren, daraufhin ein gebrauchstaugliches AR-basiertes Trainingssystem zu gestalten und dieses mit potentiellen Nutzern systematisch zu evaluieren und zu optimieren. Dabei gewährleisten die ausgewählten Methoden in den einzelnen Ablaufphasen ein ressourcenschonendes Entwicklungsvorgehen. Die Microsoft HoloLens-basierte Trainingssoftware, welche durch Anwendung des Vorgehensmodells instanziiert und iterativ weiterentwickelt wurde, bietet zudem einen innovativen, noch nie da gewesenen Lernansatz für komplexe manuelle Montageprozesse. Darüber hinaus erweitern die verschiedenen formativen Systemerprobungen, der summativ Vergleich diverser Anlernkonzepte sowie die abschließend dargelegten allgemeinen, methodischen und gestalterischen Empfehlungen die wissenschaftliche Wissensbasis mit neuen fundierten Erkenntnissen.

Nachdem die Anwendbarkeit ausgewählter wissenschaftlicher Methoden zur praktischen Problemlösung und die Nützlichkeit HMD-basierter Trainingsanwendungen für manuelle Montagetätigkeiten im industriellen Nutzungskontext in dieser Dissertation nachgewiesen wurden, sollten sich zukünftige Forschungsprojekte auf die Reduzierung des Programmieraufwands konzentrieren. Dieser ist derzeit sehr hoch und erfordert neben der aufwändigen manuellen Aufbereitung der 3D-Daten auch zeitintensive, anspruchsvolle Softwareanpassungen, selbst bei kleinsten Produkt- oder Prozessänderungen (z.B. an der Reihenfolge). Mit dem Ziel den initialen Erstellungs- und Änderungsaufwand der Trainingssoftware perspektivisch zu reduzieren und skalierbare AR-Anwendungen zu erzeugen, muss der Einsatz sogenannter Autorenwerkzeuge (engl. authoring tools) erforscht werden. Diese sollen einer Person ohne Programmierkenntnisse eine effiziente Content-Erzeugung ermöglichen. Während bisherige Lösungsansätze häufig davon ausgehen, eine erfahrene Person mit einer Vielzahl an Sensoren auszustatten, um deren Bewegungen zu analysieren, zu interpretieren und daraufhin zweidimensionale augmentierte Informationen zu generieren [230], bleiben folgende Forschungsfragen ungeklärt:

- Welche Anforderungen stellt die industrielle Anwendungsdomäne an die Gestaltung gebrauchstauglicher Autorenwerkzeuge zur Erstellung augmentierter Informationen für manuelle Montageprozesse?
- Wie muss ein Autorenwerkzeug gestaltet werden, um die effiziente Bereitstellung multimodaler augmentierter Informationen, insbesondere von 3D-Objektdaten, sicherzustellen?

Eine Beantwortung der genannten offenen Forschungsfragen sowie die Ergebnisse dieser Dissertation, vornehmlich die entwickelte Trainingssoftware, stellen die Killerapplikation für den flächendeckenden Einsatz von HMDs im industriellen Nutzungskontext dar und werden der Technologie zukünftig zum Durchbruch verhelfen.

Literaturverzeichnis

- [1] Ternès, Anabel; Towers, Ian; Jerusel, Marc (2015): Konsumentenverhalten im Zeitalter der Mass Customization: Springer Fachmedien Wiesbaden. Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-09845-2.
- [2] Alkan, Bugra; Vera, Daniel; Ahmad, Mussawar; Ahmad, Bilal; Harrison, Robert (2016): A Model for Complexity Assessment in Manual Assembly Operations Through Predetermined Motion Time Systems. In: *Procedia CIRP* 44, S. 429–434. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.111.
- [3] Holm, Magnus; Adamson, Göran; Moore, Philip; Wang, Lihui (2016): Why I want to be a Future Swedish Shop-floor Operator. In: *Procedia CIRP* 41, S. 1101–1106. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.057.
- [4] Werrlich, Stefan; Nitsche, Kai; Notni, Gunther (2017): Demand Analysis for an Augmented Reality based Assembly Training. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, S. 416–422. DOI: 10.1145/3056540.3076190.
- [5] Haritos, T.; Macchiarella, N. D. (2005): A Mobile Application of Augmented Reality for Aerospace Maintenance Training. In: *24th Digital Avionics Systems Conference 2005*, S. 5.B.3-1-5.B.3-9. DOI: 10.1109/DASC.2005.1563376.
- [6] Azuma, Ronald (1997): A Survey of Augmented Reality. In: *Teleoperators and Virtual Environments* 6, 4, S. 355–385.
- [7] Syberfeldt, Anna; Holm, Magnus; Danielsson, Oscar; Wang, Lihui; Brewster, Rodney Lindgren (2016): Support Systems on the Industrial Shop-floors of the Future – Operators’ Perspective on Augmented Reality. In: *Procedia CIRP* 44, S. 108–113. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.017.
- [8] Baird, K. M.; Barfield, W. (1999): Evaluating the effectiveness of augmented reality displays for a manual assembly task. In: *Virtual Reality* 4, S. 250–259. DOI: 10.1007/BF01421808.
- [9] Hou, Lei; Wang, Xiangyu; Truijens, Martijn (2015): Using Augmented Reality to Facilitate Piping Assembly. An Experiment-Based Evaluation. In: *Journal of Computing in Civil Engineering* 29, S. 5014007. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000344.
- [10] Loch, Frieder; Quint, Fabian; Brishtel, Iuliia (2016): Comparing Video and Augmented Reality Assistance in Manual Assembly. In: *12th International Conference on Intelligent Environments (IE)*, S. 147–150. DOI: 10.1109/IE.2016.31.
- [11] Webel, Sabine; Bockholt, Uli; Engelke, Timo; Peveri, Matteo; Olbrich, Manuel; Preusche, Carsten (2011): Augmented Reality Training for Assembly and Maintenance Skills. In: *BIO Web of Conferences* 1, S. 97. DOI: 10.1051/bioconf/20110100097.
- [12] Gavish, Nirit; Gutiérrez, Teresa; Webel, Sabine; Rodríguez, Jorge; Peveri, Matteo; Bockholt, Uli; Tecchia, Franco (2015): Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks. In: *Interactive Learning Environments* 23, S. 778–798. DOI: 10.1080/10494820.2013.815221.
- [13] Borsci, Simone; Lawson, Glyn; Salanitri, Davide; Jha, Bhavna (2016): When simulated environments make the difference. The effectiveness of different types of training of car service procedures. In: *Virtual Reality* 20, S. 83–99. DOI: 10.1007/s10055-016-0286-8.

- [14] Senderek, Roman; Geisler, Katrin (2015): Assistenzsysteme zur Lernunterstützung in der Industrie 4.0. In: Proceedings of DeLFI Workshops 2015 co-located with 13th e-Learning Conference of the German Computer Society (DeLFI 2015).
- [15] Behringer, Reinhold; Christian, Johannes; Krieger, Horst; Moore, David; Holzinger, Andreas (2011): Interaction Design of Augmented Education Environments - Augmented and Mixed Reality for performance and training support of Aviation / Automotive Technicians. In: CAL Conference 2011.
- [16] Wang, X.; Ong, S. K.; Nee, A. Y. C. (2016): A comprehensive survey of augmented reality assembly research. In: Advances in Manufacturing 4, S. 1–22. DOI: 10.1007/s40436-015-0131-4.
- [17] Evans, Gabriel; Miller, Jack; Iglesias Pena, Mariangely; MacAllister, Anastacia; Winer, Eliot (2017): Evaluating the Microsoft HoloLens through an augmented reality assembly application. In: Proceedings Volume 10197, Degraded Environments: Sensing, Processing, and Display 2017, S. 101970V. DOI: 10.1117/12.2262626.
- [18] Scavo, Giuseppe; Wild, Fridolin; Scott, Peter J. (2015): The GhostHands UX: telementoring with hands-on augmented reality instruction. In: Immersive Learning Research Network Conference - iLRN 2015, S. 236–243. DOI: 10.3233/978-1-61499-530-2-236.
- [19] Wang, Yu; Anne, Amadou; Ropp, Tim (2016): Applying the Technology Acceptance Model to Understand Aviation Students' Perceptions toward Augmented Reality Maintenance Training Instruction. In: International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace. DOI: 10.15394/ijaaa.2016.1144.
- [20] DIN EN ISO 9241-210 (2011). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme: Berlin: Beuth Verlag.
- [21] Döring, Nicola; Bortz, Jürgen (2016): Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften: Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-41088-8.
- [22] Simon, Herbert Alexander (1969): The sciences of the artificial: MIT Press. Cambridge, Mass. ISBN: 978-0262691918.
- [23] Hevner, Alan R.; March, Salvatore T.; Park, Jinsoo (2004): Design Science in Information Systems. In: MIS Quarterly Vol. 28 No. 1, S. 75–105.
- [24] van Aken, Joan E. (2004): Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences. The Quest for Field-Tested and Grounded Technological Rules. In: Journal of Management Studies 41, S. 219–246. DOI: 10.1111/j.1467-6486.2004.00430.x.
- [25] Romme, A. Georges L. (2003): Making a Difference. Organization as Design. In: Organization Science 14, S. 558–573. DOI: 10.1287/orsc.14.5.558.16769.
- [26] Gregor, Shirley; Hevner, Alan R. (2013): Positioning and Presenting Design Science Research for Maximum Impact. In: MIS Quarterly 37, S. 337–355. DOI: 10.25300/MISQ/2013/37.2.01.
- [27] March, Salvatore T.; Smith, Gerald F. (1995): Design and natural science research on information technology. In: Decision Support Systems 15, S. 251–266. DOI: 10.1016/0167-9236(94)00041-2.
- [28] Vaishnavi, Vijay; Kuechler, William (2015): Design science research methods and patterns. Innovating information and communication technology: CRC Press. Boca Raton. ISBN: 978-1-4987-1526-3.

- [29] Peffers, Ken; Tuunanen, Tuure; Rothenberger, Marcus A.; Chatterjee, Samir (2007): A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. In: *Journal of Management Information Systems* 24, S. 45–77. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302.
- [30] Venable, John; Pries-Heje, Jan; Baskerville, Richard (2012): A Comprehensive Framework for Evaluation in Design Science Research. In: *Proceedings of the 7th International Conference of Design Science Research in Information Systems and Technology* 7286, S. 423–438. DOI: 10.1007/978-3-642-29863-9_31.
- [31] Pries-Heje, Jan; Baskerville, Richard; Venable, John R. (2008): Strategies for Design Science Research Evaluation. In: *ECIS 2008 Proceedings*. 87.
- [32] Sonnenberg, Christian; Vom Brocke, Jan (2012): Evaluations in the Science of the Artificial – Reconsidering the Build-Evaluate Pattern in Design Science Research. In: *Design Science Research in Information Systems. Advances in Theory and Practice* 7286, S. 381–397. DOI: 10.1007/978-3-642-29863-9_28.
- [33] Dresch, Aline; Lacerda, Daniel Pacheco; Antunes Jr, José Antônio Valle (2015): *Design Science Research*: Springer International Publishing. Cham. ISBN: 978-3-319-07373-6.
- [34] Wächter, Michael; Bullinger, Angelika C. (2016): Gestaltung gebrauchstauglicher tangibler MMS für Industrie 4.0 – ein Leitfaden für Planer und Entwickler von mobilen Produktionsassistenzsystemen. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 70, S. 82–88. DOI: 10.1007/s41449-016-0020-0.
- [35] Adikari, Sisira; McDonald, Craig; Campbell, John (2009): Little Design Up-Front: A Design Science Approach to Integrating Usability into Agile Requirements Engineering. In: *HCI 2009: Human-Computer Interaction. New Trends*, S. 549–558. DOI: 10.1007/978-3-642-02574-7_62.
- [36] Becker, Jörg; Krcmar, Helmut; Niehaves, Björn (2009): *Wissenschaftstheorie und gestaltungsorientierte Wirtschaftsinformatik*: Physica-Verlag HD. Heidelberg. ISBN: 978-3-7908-2335-6.
- [37] Caudell, T. P.; Mizell, D. W. (1992): Augmented reality. An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In: *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences*, S. 659–669 vol.2. DOI: 10.1109/HICSS.1992.183317.
- [38] Azuma, R.; Bailiot, Y.; Behringer, R.; Feiner, S.; Julier, S.; MacIntyre, B. (2001): Recent advances in augmented reality. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 21, S. 34–47. DOI: 10.1109/38.963459.
- [39] Kipper, Greg; Rampolla, Joseph (2013): *Augmented reality. An emerging technologies guide to AR*: Syngress [u.a.]. Waltham Mass. ISBN: 9781597497343.
- [40] Milgram, Paul; Kishino, Fumio (1994): A TAXONOMY OF MIXED REALITY VISUAL DISPLAYS. In: *IEICE Transactions on Information Systems*, Vol E77-D, No.12.
- [41] Van Krevelen, D.W.F.; Poelman, Ronald (2010): A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. In: *International Journal of Virtual Reality*, 9(2):1.
- [42] Föckler, Paul; Zeidler, Thomas; Brombach, Benjamin; Bruns, Erich; Bimber, Oliver (2017): PhoneGuide: museum guidance supported by on-device object recognition on mobile phones. In: *Proceedings of the 4th international conference on Mobile and ubiquitous multimedia - MUM '05*, S. 3. DOI: 10.1145/1149488.1149490.
- [43] Schmalstieg, Dieter; Schall, Gerhard; Wagner, Daniel; Barakonyi, Istvan; Reitmayr, Gerhard; Newman, Joseph; Ledermann, Florian (2007): Managing Complex Augmented Reality Models. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 27, S. 48–57. DOI: 10.1109/MCG.2007.85.

-
- [44] Yohan, Simon Julier; Julier, Simon; Baillot, Yohan; Lanzagorta, Marco; Brown, Dennis; Rosenblum, Lawrence (2000): BARS: Battlefield Augmented Reality System. In: In NATO Symposium on Information Processing Techniques for Military Systems, S. 9–11.
- [45] Fuchs, Henry; Livingston, Mark A.; Raskar, Ramesh; Colucci, D'nardo; Keller, Kurtis; State, Andrei; Crawford, Jessica R.; Rademacher, Paul; Drake, Samuel H.; Meyer, Anthony A.: Augmented reality visualization for laparoscopic surgery. In: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention — MICCAI'98, S. 934–943. DOI: 10.1007/BFb0056282.
- [46] Pietrzak, Peter; Arya, Mani; Joseph, Jean V.; Patel, Hiten R. H. (2006): Three-dimensional visualization in laparoscopic surgery. In: BJU international 98, S. 253–256. DOI: 10.1111/j.1464-410X.2006.06287.x.
- [47] Gao, Xin; Tian, Jie; Liang, Xiaoyuan; Wang, Guiling (2014): ARPP. An Augmented Reality 3D ping-pong game system on Android mobile platform. In: Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), 2014 23rd, S. 1–6. DOI: 10.1109/WOCC.2014.6839917.
- [48] Cordeiro, Diogo; Correia, Nuno; Jesus, Rui (2015): ARZombie: A mobile augmented reality game with multimodal interaction. In: 2015 7th International Conference on Intelligent Technologies for Interactive Entertainment (INTETAIN), S. 22–31.
- [49] Tamura, Hideyuki (2002): Steady Steps and Giant Leap Toward Practical Mixed Reality Systems and Applications. In: In VAR'02: Proc. Int'l Status Conf. on Virtual and Augmented Reality, Leipzig, Germany, Nov. 2002.
- [50] Bower, Matt; Howe, Cathie; McCredie, Nerida; Robinson, Austin; Grover, David (2014): Augmented reality in Education — Cases, places, and potentials. In: 2013 IEEE 63rd Annual Conference International Council for Educational Media (ICEM), S. 1–11. DOI: 10.1109/CICEM.2013.6820176.
- [51] Radu, Iulian (2014): Augmented reality in education. A meta-review and cross-media analysis. In: Personal and Ubiquitous Computing 18, S. 1533–1543. DOI: 10.1007/s00779-013-0747-y.
- [52] Fite-Georgel, Pierre (2011): Is there a reality in Industrial Augmented Reality? In: 10th IEEE International Symposium, S. 201–210. DOI: 10.1109/ISMAR.2011.6092387.
- [53] Regenbrecht, H. T.; Wagner, M.; Barattoff, G. (2002): MagicMeeting. A Collaborative Tangible Augmented Reality System. In: Virtual Reality 6, S. 151–166. DOI: 10.1007/s100550200016.
- [54] Klinker, Gudrun; Stricker, Didier; Reiners, Dirk (2001): Augmented Reality for Exterior Construction Applications. In: AUGMENTED REALITY AND WEARABLE COMPUTERS.
- [55] DIN 31051:2012-09, Grundlagen der Instandhaltung.
- [56] Fiorentino, Michele; Uva, Antonio E.; Gattullo, Michele; Debernardis, Saverio; Monno, Giuseppe (2014): Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions. In: Computers in Industry 65, S. 270–278. DOI: 10.1016/j.compind.2013.11.004.
- [57] Zokai, S.; Esteve, J.; Genc, Y.; Navab, N. (2003): Multiview paraperspective projection model for diminished reality. In: The Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2003. Proceedings., S. 217–226. DOI: 10.1109/ISMAR.2003.1240705.
- [58] Ishii, Hirotake; Shimoda, Hiroshi; Nakai, Toshinori; Izumi, Masanori; Bian, Zhiqiang; Morishita, Yoshitsugu (2009): Proposal and Evaluation of a Supporting Method for NPP Decommissioning Work by Augmented Reality. In: World Multiconference Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI).
-

- [59] Tang, Arthur; Owen, Charles; Biocca, Frank; Mou, Weimin (2003): Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI'03, S. 73. DOI: 10.1145/642611.642626.
- [60] Blattgerste, Jonas; Renner, Patrick; Streng, Benjamin; Thies, Pfeiffer (2018): In-Situ Instructions Exceed Side-by-Side Instructions in Augmented Reality Assisted Assembly. In: PETRA '18: The 11th Pervasive Technologies Related to Assistive Environments Conference. ACM. DOI: 10.1145/3197768.3197778.
- [61] Boud, A. C.; Haniff, D. J.; Baber, C.; Steiner, S. J. (1999): Virtual reality and augmented reality as a training tool for assembly tasks. In: IEEE International Conference on Information Visualization (Cat. No. PR00210), S. 32–36. DOI: 10.1109/IV.1999.781532.
- [62] Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (2012): Montage in der industriellen Produktion: Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-29060-2.
- [63] Lotter, Bruno (2012): Manuelle Montage von Kleingeräten. In: Lotter, Wiendahl (Hg.) 2012 – Montage in der industriellen Produktion, S. 109–146. DOI: 10.1007/978-3-642-29061-9_5.
- [64] IATF 16949:2016, Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie 1. Ausgabe, Oktober 2016.
- [65] Webel, Sabine; Bockholt, Uli; Engelke, Timo; Gavish, Nirit; Olbrich, Manuel; Preusche, Carsten (2013): An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills. In: Robotics and Autonomous Systems 61, S. 398–403. DOI: 10.1016/j.robot.2012.09.013.
- [66] Patron, Christian (2005): Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung: Utz.München. ISBN: 3-8316-0474-6.
- [67] Syberfeldt, Anna; Danielsson, Oscar; Holm, Magnus; Wang, Lihui (2015): Visual Assembling Guidance Using Augmented Reality. In: Procedia Manufacturing 1, S. 98–109. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.09.068.
- [68] Funk, Markus; Mayer, Sven; Nistor, Michael; Schmidt, Albrecht (2016): Mobile In-Situ Pick-by-Vision: Order Picking Support using a Projector Helmet. In: Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments. DOI: 10.1145/2910674.2910730.
- [69] Carmigniani, Julie; Furht, Borko; Anisetti, Marco; Ceravolo, Paolo; Damiani, Ernesto; Ivkovic, Misa (2011): Augmented reality technologies, systems and applications. In: Multimedia Tools and Applications 51, S. 341–377. DOI: 10.1007/s11042-010-0660-6.
- [70] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (2016): Head Mounted Displays - Arbeitshilfen der Zukunft. Bedingungen für den sicheren und ergonomischen Einsatz monokularer Systeme. DOI: 10.21934/baua:praxis20160809.
- [71] Rolland, J.P.; Holloway, R.L.; Fuchs, H. (1994): A comparison of optical and video see-through head-mounted displays. In: SPIE Vol. 2351 Telemanipulator and Telepresence Technologies, S. 293–307.
- [72] Syberfeldt, Anna; Danielsson, Oscar; Gustavsson, Patrik (2017): Augmented Reality Smart Glasses in the Smart Factory. Product Evaluation Guidelines and Review of Available Products. In: IEEE Access 5, S. 9118–9130. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2703952.
- [73] Sutherland, Ivan (1965): The Ultimate Display. In: Proceedings of the IFIP Congress, S. 506–508.

- [74] Fraga-Lamas, Paula; Fernandez-Carames, Tiago M.; Blanco-Novoa, Oscar; Vilar-Montesinos, Miguel A. (2018): A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard. In: IEEE Access 6, S. 13358–13375. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2808326.
- [75] Cronin, Patricia; Ryan, Frances; Coughlan, Michael (2008): Undertaking a literature review. A step-by-step approach. In: British journal of nursing (Mark Allen Publishing) 17, S. 38–43. DOI: 10.12968/bjon.2008.17.1.28059.
- [76] Fink, Arlene (2014): Conducting research literature reviews. From the internet to paper: SAGE.Los Angeles. ISBN: 978-1-4522-5949-9.
- [77] Okoli, Chitu; Schabram, Kira (2010): A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research. In: SSRN Electronic Journal. DOI: 10.2139/ssrn.1954824.
- [78] Wächter, Michael (2018): Engineering-Methode zur Gestaltung gebrauchstauglicher tangibler Mensch-Maschine-Schnittstellen für Planer und Entwickler von Produktionsassistenzsystemen: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme; Heft 127 (Januar 2018).Chemnitz. ISBN: 978-3-00-058063-5.
- [79] Dünser, Andreas; Grasset, Raphaël; Billinghamurst, Mark (2008): A survey of evaluation techniques used in augmented reality studies. In: HIT Lab NZ Technical Report TR-2008-02, S. 1–27. DOI: 10.1145/1508044.1508049.
- [80] Werrlich, Stefan; Eichstetter, Elisabeth; Nitsche, Kai; Notni, Gunther (2017): An Overview of Evaluations Using Augmented Reality for Assembly Training Tasks. In: International Journal of Computer and Information Engineering, S. 1129–1134.
- [81] Navab, N. (2004): Developing killer apps for industrial augmented reality. In: IEEE Computer Graphics and Applications 24, S. 16–20. DOI: 10.1109/MCG.2004.1297006.
- [82] Gould, John D.; Lewis, Clayton (1985): Designing for usability. Key principles and what designers think. In: Communications of the ACM 28, S. 300–311. DOI: 10.1145/3166.3170.
- [83] Rogers, Yvonne; Sharp, Helen; Preece, Jenny (2015): Interaction Design: Beyond Human–Computer Interaction.
- [84] Gabbard, J. L.; Hix, D.; Swan, J. E. (1999): User-centered design and evaluation of virtual environments. In: IEEE Computer Graphics and Applications 19, S. 51–59. DOI: 10.1109/38.799740.
- [85] Hix, D.; Gabbard, J. L.; Swan, J. E.; Livingston, M. A.; Hollerer, T. H.; Julier, S. J.; Bailiot, Y.; Brown, D. (2004): A cost-effective usability evaluation progression for novel interactive systems. In: Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. DOI: 10.1109/HICSS.2004.1265653.
- [86] Nielsen, Jakob; Molich, Rolf (1990): Heuristic evaluation of user interfaces. In: CHI '90 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, S. 249–256. DOI: 10.1145/97243.97281.
- [87] Hix, Deborah; Hartson, H. Rex (1993): Developing user interfaces. Ensuring usability through product & process: Wiley.New York. ISBN: 0471578134.
- [88] Chimienti, V; Iliano, S; Dassisti, M; Dini, G; Failli, F (2010): Guidelines for Implementing Augmented Reality Procedures in Assisting Assembly Operations. In: Ratchev S. (eds) Precision Assembly Technologies and Systems. DOI: 10.1007/978-3-642-11598-1_20.

- [89] Nielsen, J. (1992): The usability engineering life cycle. In: Computer 25, S. 12–22. DOI: 10.1109/2.121503.
- [90] Bullinger, Hans-Jörg; Ziegler, Jürgen; Bauer, Wilhelm (2002): Intuitive Human-Computer Interaction-Toward a User-Friendly Information Society. In: International Journal of Human-Computer Interaction 14, S. 1–23. DOI: 10.1207/S15327590IJHC1401_1.
- [91] Regenbrecht, H.; Baratoff, G.; Wilke, W. (2005): Augmented Reality Projects in the Automotive and Aerospace Industries. In: IEEE Computer Graphics and Applications 25, S. 48–56. DOI: 10.1109/MCG.2005.124.
- [92] Webel, Sabine; Bockholt, Ulrich; Engelke, Timo; Gavish, Nirit; Tecchia, Franco (2011): Design Recommendations for Augmented Reality based Training of Maintenance Skills. In: Alem L., Huang W. (eds) Recent Trends of Mobile Collaborative Augmented Reality Systems, S. 69–82. DOI: 10.1007/978-1-4419-9845-3_5.
- [93] Webel, Sabine; Bockholt, Ulrich; Keil, Jens (2011): Design Criteria for AR-Based Training of Maintenance and Assembly Tasks. In: Shumaker R. (eds) Virtual and Mixed Reality - New Trends. VMR 2011. Lecture Notes in Computer Science, vol 6773, S. 123–132.
- [94] Gavish, Nirit; Gutierrez, Teresa; Webel, Sabine; Rodriguez, Jorge; Tecchia, Franco (2011): Design Guidelines for the Development of Virtual Reality and Augmented Reality Training Systems for Maintenance and Assembly Tasks. In: BIO Web of Conferences 1, S. 29. DOI: 10.1051/bioconf/20110100029.
- [95] Tulving, Endel (1985): How many memory systems are there? In: American Psychologist 40, S. 385–398. DOI: 10.1037/0003-066X.40.4.385.
- [96] Dutke, Stephan (1994): Mentale Modelle: Konstrukte des Wissens und Verstehens. Kognitionspsychologische Grundlagen für die Software-Ergonomie: Verl. für Angewandte Psychologie. Göttingen u.a. ISBN: 3-87844-111-8.
- [97] Taatgen, Niels A.; Huss, David; Dickison, Daniel; Anderson, John R. (2008): The acquisition of robust and flexible cognitive skills. In: Journal of experimental psychology. General 137, S. 548–565. DOI: 10.1037/0096-3445.137.3.548.
- [98] Fitts, PM; Posner, MI (1967): Human Performance. In: Brooks/Cole Pub. Co; Belmont, CA.
- [99] Eiriksdottir, Elsa; Catrambone, Richard (2011): Procedural instructions, principles, and examples. How to structure instructions for procedural tasks to enhance performance, learning, and transfer. In: Human factors 53, S. 749–770. DOI: 10.1177/0018720811419154.
- [100] Gupta, Prahlad; Cohen, Neal J. (2002): Theoretical and computational analysis of skill learning, repetition priming, and procedural memory. In: Psychological Review 109, S. 401–448. DOI: 10.1037/0033-295X.109.2.401.
- [101] Hochmitz, Ilanit; Yuviler-Gavish, Nirit (2011): Physical fidelity versus cognitive fidelity training in procedural skills acquisition. In: Human factors 53, S. 489–501. DOI: 10.1177/0018720811412777.
- [102] Webel, Sabine (2011): Multimodal Training of Maintenance and Assembly Skills Based on Augmented Reality [Dissertation]. Darmstadt: TU Darmstadt.
- [103] Valimont, R. B.; Vincenzi, D. A.; Gangadharan, S. N.; Majoros, A. E. (2002): The effectiveness of augmented reality as a facilitator of information acquisition. In: Proceedings. The 21st Digital Avionics Systems Conference, S. 7C5-1-7C5-9. DOI: 10.1109/DASC.2002.1052926.

- [104] Vincenzi, Dennis A.; Valimont, Brian; Macchiarella, Nickolas; Opalenik, Chris; Gangadharan, Sathya (2003): The Effectiveness of Cognitive Elaboration Using Augmented Reality as a Training and Learning Paradigm. In: PROCEEDINGS of the HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY 47th ANNUAL MEETING, S. 2054–2058.
- [105] Macchiarella, N. D.; Vincenzi, D. A. (2004): Augmented reality in a learning paradigm for flight aerospace maintenance training. In: The 23rd Digital Avionics Systems Conference (IEEE Cat. No.04CH37576), S. 5.D.1-5.1-9. DOI: 10.1109/DASC.2004.1391342.
- [106] Pathomaree, N.; Charoenseang, S. (2005): Augmented reality for skill transfer in assembly task. In: IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, S. 500–504. DOI: 10.1109/ROMAN.2005.1513829.
- [107] Gavish, Nirit; Gutierrez Seco, Teresa; Webel, Sabine; Rodriguez, Jorge; Peveri, Matteo; Bockholt, Uli (2011): Transfer of Skills Evaluation for Assembly and Maintenance Training. In: BIO Web of Conferences 1, S. 28. DOI: 10.1051/bioconf/20110100028.
- [108] Peniche, Amaury; Diaz, Christian; Trefftz, Helmuth; Paramo, Gabriel (2012): Combining virtual and augmented reality to improve the mechanical assembly training process in manufacturing. In: Proceedings of the 6th WSEAS international conference on Computer Engineering and Applications, S. 292–297.
- [109] Rohidatun, M.W.; Faieza, A.A.; Rosnah, M.Y.; Hayati, S. Nor; Rahinah, I. (2016): Development of virtual reality (VR) system with haptic controller and augmented reality (AR) system to enhance learning and training experience. In: International Journal of Applied Engineering Research, S. 8806–8809.
- [110] Hou, Lei; Wang, Xiangyu; Bernold, Leonhard; Love, Peter E. D. (2013): Using Animated Augmented Reality to Cognitively Guide Assembly. In: Journal of Computing in Civil Engineering 27, S. 439–451. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000184.
- [111] Hořejší, Petr (2015): Augmented Reality System for Virtual Training of Parts Assembly. In: Procedia Engineering 100, S. 699–706. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.422.
- [112] Tang, Arthur; Owen, Charles; Biocca, Frank; Mou, Weimin (2004): Performance Evaluation of Augmented Reality for Directed Assembly. In: Ong S.K., Nee A.Y.C. (eds) Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing, S. 311–331. DOI: 10.1007/978-1-4471-3873-0_16.
- [113] Hou, Lei; Wang, Xiangyu (2013): A study on the benefits of augmented reality in retaining working memory in assembly tasks. A focus on differences in gender. In: Automation in Construction 32, S. 38–45. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.12.007.
- [114] Westerfield, Giles; Mitrovic, Antonija; Billinghamurst, Mark (2015): Intelligent Augmented Reality Training for Motherboard Assembly. In: International Journal of Artificial Intelligence in Education 25, S. 157–172. DOI: 10.1007/s40593-014-0032-x.
- [115] Gonzalez-Franco, Mar; Pizarro, Rodrigo; Cermeron, Julio; Li, Katie; Thorn, Jacob; Hutabarat, Windo; Tiwari, Ashutosh; Bermell-Garcia, Pablo (2017): Immersive Mixed Reality for Manufacturing Training. In: Frontiers in Robotics and AI 4, S. 1. DOI: 10.3389/frobt.2017.00003.
- [116] Funk, Markus (2016): Augmented reality at the workplace: A context-aware assistive system using in-situ projection [Dissertation]: Universität Stuttgart.

- [117] Langley, A.; Lawson, G.; Hermawati, S.; D'Cruz, M.; Apold, J.; Arlt, F.; Mura, K. (2016): Establishing the Usability of a Virtual Training System for Assembly Operations within the Automotive Industry. In: *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries* 26, S. 667–679. DOI: 10.1002/hfm.20406.
- [118] Schulz, Marlen; Mack, Birgit; Renn, Ortwin (2012): *Fokusgruppen in der empirischen Sozialwissenschaft*: VS Verlag für Sozialwissenschaften. Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-19396-0.
- [119] Rabiee, Fatemeh (2004): Focus-group interview and data analysis. In: *Proceedings of the Nutrition Society* 63, S. 655–660. DOI: 10.1079/PNS2004399.
- [120] Taylor, Allen G. (2016): Developing with Unity and Visual Studio. In: *Develop Microsoft HoloLens Apps Now*. Apress, Berkeley, CA, S. 75–90. DOI: 10.1007/978-1-4842-2202-7_9.
- [121] Jarr, Klaus (1978): *Stochastische Personalplanungen*: Gabler Verlag. Wiesbaden. ISBN: 978-3-409-38421-6.
- [122] Billinghamurst, Mark; Clark, Adrian; Lee, Gun (2015): A Survey of Augmented Reality. In: *Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction* 8, S. 73–272. DOI: 10.1561/11000000049.
- [123] Dey, Arindam; Billinghamurst, Mark; Lindeman, Robert W.; Swan, J. Edward (2018): A Systematic Review of 10 Years of Augmented Reality Usability Studies. 2005 to 2014. In: *Frontiers in Robotics and AI* 5, S. 161. DOI: 10.3389/frobt.2018.00037.
- [124] Zühlke, Detlef (2012): *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen*: Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-22073-9.
- [125] Flick, Uwe (2011): *Triangulation*: VS Verlag für Sozialwissenschaften. Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-18125-7.
- [126] Denzin, Norman K. (1978): *The research act. A theoretical introduction to sociological methods*. ISBN: 0-07-016361-8.
- [127] Anastassova, M.; Burkhardt, J.M.; Mégard, C. (2007): User-Centred Design and Evaluation of Augmented Reality Systems for Industrial Applications: Some Deadlocks and Breakthroughs. In: *Virtual Reality International Conference (VRIC)*.
- [128] DIN SPEC 91328:2016 - Ressourcenschonende Anwendung von Methoden und Werkzeugen zur menschenzentrierten Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver IT-Systeme. Berlin: Berlin: Beuth Verlag.
- [129] Bowen, Glenn A. (2009): Document Analysis as a Qualitative Research Method. In: *Qualitative Research Journal* 9, S. 27–40. DOI: 10.3316/QRJ0902027.
- [130] Preece, Jenny; Rogers, Yvonne; Sharp, Helen (2015): *Interaction design. Beyond human-computer interaction*: Wiley. Chichester. ISBN: 9781119088790.
- [131] Wallach, Dieter; Scholz, Sebastian C. (2012): User-Centered Design. Why and How to Put Users First in Software Development. In: Maedche, Botzenhardt et al. (Hg.) 2012 – *Software for People*, S. 11–38. DOI: 10.1007/978-3-642-31371-4_2.
- [132] van Someren, Maarten W.; Barnard, Yvonne F.; Sandberg, Jacobijn A. C. (1994): *The think aloud method. A practical guide to modelling cognitive processes*: Academic Press. London. ISBN: 0-12-714270-3.
- [133] Doody, Owen; Noonan, Maria (2013): Preparing and conducting interviews to collect data. In: *Nurse Researcher* 20, S. 28–32. DOI: 10.7748/nr2013.05.20.5.28.e327.

- [134] Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (2010): Leitfaden Usability - Version 1.3.
- [135] Osterwalder, Alexander; Pigneur, Yves (2014): Value proposition design. How to create products and services customers want: Wiley.Hoboken NJ u.a. ISBN: 978-1-118-96805-5.
- [136] Richter, Michael; Flückiger, Markus D. (2016): Usability und UX kompakt: Springer Berlin Heidelberg.Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-49827-9.
- [137] Nielsen, Jakob (1989): Usability engineering at a discount. In: Proceedings of the third international conference on human-computer interaction on Designing and using human-computer interfaces and knowledge based systems (2nd ed.), S. 394–401.
- [138] Dresing, Thorsten; Pehl, Thorsten (2017): Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse. Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende: Eigenverlag.Marburg. ISBN: 978-3-8185-0489-2.
- [139] Neale, Helen; Nichols, Sarah (2001): Theme-based content analysis. A flexible method for virtual environment evaluation. In: International Journal of Human-Computer Studies 55, S. 167–189. DOI: 10.1006/ijhc.2001.0475.
- [140] Buxton, Bill (2011): Sketching user experiences. Getting the design right and the right design: Morgan Kaufmann.Amsterdam. ISBN: 978-0-12-374037-3.
- [141] Christoforakos, Lara; Diefenbach, Sarah (2017): Erfolgreiches Prototyping im Ideenstadium der Produktentwicklung. In: S. Hess & H. Fischer (Hrsg.): Mensch und Computer 2017 – Usability Professionals, S. 329–335. DOI: 10.18420/muc2017-up-0193.
- [142] Anastassova, Margarita; Mégard, Christine; Burkhardt, Jean-Marie (2007): Prototype Evaluation and User-Needs Analysis in the Early Design of Emerging Technologies. In: Jacko J.A. (eds) Human-Computer Interaction. Interaction Design and Usability. HCI 2007. Lecture Notes in Computer Science, vol 4550, S. 383–392. DOI: 10.1007/978-3-540-73105-4_42.
- [143] Sá, Marco de; Churchill, Elizabeth (2012): Mobile augmented reality. In: MobileHCI '12 Proceedings of the 14th international conference on Human-computer interaction with mobile devices and services, S. 221–230. DOI: 10.1145/2371574.2371608.
- [144] Radkowski, Rafael; Ingebrand, Jarid (2017): HoloLens for Assembly Assistance - A Focus Group Report. In: Lackey S., Chen J. (eds) Virtual, Augmented and Mixed Reality. VAMR 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10280. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-57987-0_22.
- [145] Werrlich, Stefan; Lorber, Carolin; Nguyen, Phuc-Anh; Yanez, Carlos Emilio Franco; Notni, Gunther (2018): Assembly Training: Comparing the Effects of Head-Mounted Displays and Face-to-Face Training. In: Chen J., Fragomeni G. (eds) Virtual, Augmented and Mixed Reality: Interaction, Navigation, Visualization, Embodiment, and Simulation, S. 462–476. DOI: 10.1007/978-3-319-91581-4_35.
- [146] Han, Jian; Liu, Juan; Yao, Xincheng; Wang, Yongtian (2015): Portable waveguide display system with a large field of view by integrating freeform elements and volume holograms. In: Optics express 23, S. 3534–3549. DOI: 10.1364/OE.23.003534.
- [147] Billinghurst, M.; Poupyrev, I.; Kato, H.; May, R. (2000): Mixing realities in Shared Space. An augmented reality interface for collaborative computing. In: 2000 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. ICME2000. Proceedings. Latest Advances in the Fast Changing World of Multimedia (Cat. No.00TH8532), S. 1641–1644. DOI: 10.1109/ICME.2000.871085.

- [148] Kato, H.; Billinghurst, M. (1999): Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In: Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR'99), S. 85–94. DOI: 10.1109/IWAR.1999.803809.
- [149] Fiala, M. (2005): ARTag, a Fiducial Marker System Using Digital Techniques. In: 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), S. 590–596. DOI: 10.1109/CVPR.2005.74.
- [150] Neumann, U.; You, S. (1999): Natural feature tracking for augmented reality. In: IEEE Transactions on Multimedia 1, S. 53–64. DOI: 10.1109/6046.748171.
- [151] Peng, Fuguo; Zhai, Jing (2017): A mobile augmented reality system for exhibition hall based on Vuforia. In: 2017 2nd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC), S. 1049–1052. DOI: 10.1109/ICIVC.2017.7984714.
- [152] Wuest, H.; Vial, F.; Strieker, D. (2005): Adaptive line tracking with multiple hypotheses for augmented reality. In: Fourth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'05), S. 62–69. DOI: 10.1109/ISMAR.2005.8.
- [153] Vacchetti, L.; Lepetit, V.; Fua, P. (2003): Fusing online and offline information for stable 3D tracking in real-time. In: 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings., S. II-241-8. DOI: 10.1109/CVPR.2003.1211476.
- [154] Klein, Georg; Murray, David (2007): Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces. In: 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, S. 1–10. DOI: 10.1109/ISMAR.2007.4538852.
- [155] Ergonomie der Mensch-System-Interaktion –Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006); Deutsche Fassung EN ISO 9241-110:2006. Berlin: Beuth Verlag.
- [156] Halata, Philipp Sebastian (2018): Augmented-Reality-gestützte Informationsbereitstellung für die Unikatproduktion [Dissertation]. Hamburg: TU Hamburg.
- [157] Funk, Markus; Kosch, Thomas; Greenwald, Scott W.; Schmidt, Albrecht (2015): A benchmark for interactive augmented reality instructions for assembly tasks. In: Proceedings of the 14th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, S. 253–257. DOI: 10.1145/2836041.2836067.
- [158] Biocca, F.; Tang, A.; Owen, C.; Fan, Xiao (2006): The Omnidirectional Attention Funnel. A Dynamic 3D Cursor for Mobile Augmented Reality Systems. In: Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'06), S. 1115-1122. DOI: 10.1109/HICSS.2006.476.
- [159] Schwerdtfeger, Bjorn; Klinker, Gudrun (2008): Supporting order picking with Augmented Reality. In: 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, S. 91–94. DOI: 10.1109/ISMAR.2008.4637331.
- [160] Reif, Rupert; Günthner, Willibald A. (2009): Pick-by-vision. Augmented reality supported order picking. In: The Visual Computer 25, S. 461–467. DOI: 10.1007/s00371-009-0348-y.
- [161] Kruijff, Ernst; Swan, J. Edward; Feiner, Steven (2010): Perceptual issues in augmented reality revisited. In: 2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, S. 3–12. DOI: 10.1109/ISMAR.2010.5643530.

- [162] Blattgerste, Jonas; Streng, Benjamin; Renner, Patrick; Pfeiffer, Thies; Essig, Kai (2017): Comparing Conventional and Augmented Reality Instructions for Manual Assembly Tasks. In: Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, S. 75–82. DOI: 10.1145/3056540.3056547.
- [163] Khuong, Bui Minh; Kiyokawa, Kiyoshi; Miller, Andrew; La Viola, Joseph J.; Mashita, Tomohiro; Takemura, Haruo (2014): The effectiveness of an AR-based context-aware assembly support system in object assembly. In: 2014 IEEE Virtual Reality (VR), S. 57–62. DOI: 10.1109/VR.2014.6802051.
- [164] Kraut, Robert E.; Fussell, Susan R.; Siegel, Jane (2003): Visual Information as a Conversational Resource in Collaborative Physical Tasks. In: Human–Computer Interaction 18, S. 13–49. DOI: 10.1207/S15327051HCI1812_2.
- [165] Henderson, Steven J.; Feiner, Steven K. (2011): Augmented reality in the psychomotor phase of a procedural task. In: 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, S. 191–200. DOI: 10.1109/ISMAR.2011.6092386.
- [166] Grünwied, Gertrud (2017): Usability von Produkten und Anleitungen im digitalen Zeitalter. Handbuch für Entwickler, IT-Spezialisten und Technische Redakteure: mit Checklisten und Fallstudien: Publicis Pixelpark.Erlangen. ISBN: 978-3895784644.
- [167] Moreno, Roxana; Mayer, Richard (2007): Interactive Multimodal Learning Environments. In: Educational Psychology Review 19, S. 309–326. DOI: 10.1007/s10648-007-9047-2.
- [168] Sankey, Michael; Birch, Dawn; Gardiner, Michael (2010): Engaging students through multimodal learning environments: The journey continues. In: Proceedings ascilite Sydney 2010.
- [169] Yim, Ho Bin; Seong, Poong Hyun (2010): Heuristic guidelines and experimental evaluation of effective augmented-reality based instructions for maintenance in nuclear power plants. In: Nuclear Engineering and Design 240, S. 4096–4102. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.08.023.
- [170] Pötters, Patrick; Klöckner, Isabel; Leyendecker, Bert (2017): Gamification in der Montage. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112, S. 163–167. DOI: 10.3139/104.111679.
- [171] Deterding, Sebastian; Dixon, Dan; Khaled, Rilla; Nacke, Lennart (2011): From game design elements to gamefulness: defining "gamification". In: Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments, S. 9–15. DOI: 10.1145/2181037.2181040.
- [172] Zichermann, Gabe; Cunningham, Christopher (2011): Gamification by design: Implementing game mechanics in web and mobile apps.: O'Reilly.S.I. ISBN: 978-1-449-39767-8.
- [173] Korn, Oliver (2012): Industrial playgrounds: how gamification helps to enrich work for elderly or impaired persons in production. In: Proceedings of the 4th ACM SIGCHI symposium on Engineering interactive computing systems, S. 313–316. DOI: 10.1145/2305484.2305539.
- [174] Korn, Oliver; Schmidt, Albrecht; Hörz, Thomas (2012): Assistive systems in production environments: exploring motion recognition and gamification. In: Proceedings of the 5th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, S. 1–5. DOI: 10.1145/2413097.2413109.
- [175] Elliot, Andrew J.; Dweck, Carol S. (2005): Handbook of competence and motivation: Guilford Press.New York. ISBN: 978-1593851231.

- [176] Korn, Oliver; Funk, Markus; Schmidt, Albrecht (2015): Design approaches for the gamification of production environments. In: Proceedings of the 8th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, S. 1–7. DOI: 10.1145/2769493.2769549.
- [177] Sigrist, Roland; Rauter, Georg; Riener, Robert; Wolf, Peter (2013): Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review. In: Psychonomic bulletin & review 20, S. 21–53. DOI: 10.3758/s13423-012-0333-8.
- [178] Korn, Oliver; Funk, Markus; Schmidt, Albrecht (2015): Towards a Gamification of Industrial Production. A Comparative Study in Sheltered Work Environments. In: Proceedings of the 7th ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems, S. 84–93. DOI: 10.1145/2774225.2774834.
- [179] Radkowski, Rafael (2015): Investigation of Visual Features for Augmented Reality Assembly Assistance. In: Shumaker, Lackey (Hg.) 2015 – Virtual, Augmented and Mixed Reality, S. 488–498. DOI: 10.1007/978-3-319-21067-4_50.
- [180] Jacob, Robert J.K.; Girouard, Audrey; Hirshfield, Leanne M.; Horn, Michael S.; Shaer, Orit; Solovey, Erin Treacy; Zigelbaum, Jamie (2008): Reality-based interaction: a framework for post-WIMP interfaces. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, S. 201–210. DOI: 10.1145/1357054.1357089.
- [181] Norman, Donald A. (2013): The design of everyday things: Basic Books. New York, NY. ISBN: 978-0465050659.
- [182] Shneiderman, Ben; Plaisant, Catherine (2005): Designing the user interface. Strategies for effective human-computer interaction. ISBN: 0-321-19786-0.
- [183] Reis, Helena M.; Borges, Simone S.; Durelli, Vinicius H.S.; Fernando de S. Moro, Luis; Brandao, Anarosa A.F.; Barbosa, Ellen F.; Brandao, Leonidas O.; Isotani, Seiji; Jaques, Patricia A.; Bittencourt, Ig I. (2012): Towards Reducing Cognitive Load and Enhancing Usability through a Reduced Graphical User Interface for a Dynamic Geometry System. An Experimental Study. In: 2012 IEEE International Symposium on Multimedia, S. 445–450. DOI: 10.1109/ISM.2012.91.
- [184] Björn Schwerdtfeger (30.12.2009): Pick-by-vision: Bringing Hmd-based Augmented Reality into the Warehouse [Dissertation]: TU München.
- [185] LaViola, Joseph J. (2017): 3D user interfaces. Theory and practice: Addison-Wesley. Boston. ISBN: 978-0134034324.
- [186] Endsley, Tristan C.; Sprehn, Kelly A.; Brill, Ryan M.; Ryan, Kimberly J.; Vincent, Emily C.; Martin, James M. (2017): Augmented Reality Design Heuristics. Designing for Dynamic Interactions. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 61, S. 2100–2104. DOI: 10.1177/1541931213602007.
- [187] Baxter, Kathy; Courage, Catherine; Caine, Kelly (2015): Understanding your users. A practical guide to user research methods: Morgan Kaufmann. Waltham, MA. ISBN: 978-0-12-800232-2.
- [188] Kompetenzzentrum Usability Mittelstand (2015): <https://www.usabilityzentrum.de/dokumente/Methodenhandbuch.pdf>. Zuletzt geprüft am: 01.10.2018.
- [189] Jacobsen, Niels E.; John, Bonnie E. (2000): Two Case Studies in Using Cognitive Walkthrough for Interface Evaluation. In: Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon University, School of Computer Science, No. CMU-CS-00-132.

- [190] Dünser, Andreas; Billinghamurst, Mark: Evaluating Augmented Reality Systems 2011, S. 289–307. DOI: 10.1007/978-1-4614-0064-6_13.
- [191] Nielsen, Jakob; Landauer, Thomas K. (1993): A mathematical model of the finding of usability problems. In: CHI '93 Proceedings of the INTERACT '93 and CHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems, S. 206–213. DOI: 10.1145/169059.169166.
- [192] Baauw, Ester; Markopoulous, Panos (2004): A comparison of think-aloud and post-task interview for usability testing with children. In: Proceedings of the 2004 conference on Interaction design and children: building a community, S. 115–116. DOI: 10.1145/1017833.1017848.
- [193] Konrad, Klaus (2010): Lautes Denken. In: Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie, S. 476–490. DOI: 10.1007/978-3-531-92052-8.
- [194] Nielsen, Jakob (1993): Usability engineering: Morgan Kaufmann Publishers.San Francisco, Calif. ISBN: 9780080520292.
- [195] Winter, Dominique; Schrepp, Martin; Thomaschewski, Jörg (2015): Faktoren der User Experience - Systematische Übersicht über produktrelevante UX-Qualitätsaspekte. In: Endmann, A., Fischer, H. & Krökel, M.(Hrsg.), Mensch und Computer 2015 – Usability Professionals, S. 33–41.
- [196] Assila, Ahlem; de Oliveira, Kathia Marcal; Ezzedime, Houcine (2016): Standardized Usability Questionnaires: Features and Quality Focus. In: electronic Journal of Computer Science and Information Technology (eJCSIT), Vol. 6, No. 1, S. 15–31.
- [197] Schrepp, Martin; Hinderks, Andreas; Thomaschewski, Jörg (2016): User Experience mit Fragebögen evaluieren - Tipps und Tricks für Datenerhebung, Auswertung und Präsentation der Ergebnisse. In: S. Hess & H. Fischer (Hrsg.): Mensch und Computer 2016 – Usability Professionals. DOI: 10.18420/muc2016-up-0016.
- [198] Santos, Marc Ericson C.; Polvi, Jarkko; Taketomi, Takafumi; Yamamoto, Goshiro; Sandor, Christian; Kato, Hirokazu (2015): Toward Standard Usability Questionnaires for Handheld Augmented Reality. In: IEEE Computer Graphics and Applications 35, S. 66–75. DOI: 10.1109/MCG.2015.94.
- [199] Brooke, J. (1996): SUS - A quick and dirty usability scale. In: Usability evaluation in industry, S. 189–194.
- [200] Bangor, Aaron; Kortum, Philip; Miller, James (2009): Determining what individual SUS scores mean: adding an adjective rating scale. In: Journal of Usability Studies Volume 4 Issue 3, S. 114–123.
- [201] Hart, Sandra G.; Staveland, Lowell E. (1988): Development of NASA-TLX (Task Load Index). Results of Empirical and Theoretical Research. In: Advances in Psychology 52, S. 139–183. DOI: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9.
- [202] Hart, Sandra G. (2016): Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 50, S. 904–908. DOI: 10.1177/154193120605000909.
- [203] Hassenzahl, M.; Burmeser, M.; Koller, F. (2003): AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In: J. Ziegler & G. Szwillus (Eds.), Mensch & Computer 2003. Interaktion in Bewegung, S. 187–196.

- [204] Hassenzahl, Mare; Platz, Axel; Burmester, Michael; Lehner, Katrin (2000): Hedonic and ergonomic quality aspects determine a software's appeal. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, S. 201–208. DOI: 10.1145/332040.332432.
- [205] Hassenzahl, Marc (2004): Mit dem AttrakDiff die Attraktivität interaktiver Produkte messen. In: Hassenzahl, M. & Peissner, M.(Hrsg.), Tagungsband UP04, S. 96–102.
- [206] Hassenzahl, Marc; Koller, Franz; Burmester, Michael (2008): Der User Experience (UX) auf der Spur: Zum Einsatz von www.attrakdiff.de. In: Brau, H., Diefenbach, S., Hassenzahl, M., Koller, F., Peissner, M. & Röse, K.(Hrsg.), Tagungsband UP08, S. 78–82.
- [207] Laugwitz, Bettina; Schrepp, Martin; Held, Theo (2006): Konstruktion eines Fragebogens zur Messung der User Experience von Softwareprodukten. In: A. M. Heinecke, H. Paul (Hrsg.): Mensch & Computer 2006: Mensch und Computer im StrukturWandel, S. 125–134. DOI: 10.1524/9783486841749.125.
- [208] Laugwitz, Bettina; Schubert, Ulf; Ilmberger, Waltraud; Tamm, Nina; Held, Theo; Schrepp, Martin (2009): Subjektive Benutzerzufriedenheit quantitativ erfassen: Erfahrungen mit dem User Experience Questionnaire UEQ. In: Brau, H., Diefenbach, S., Hassenzahl, M., Kohler, K., Koller, F., Peissner, M., Petrovic, K., Thielsch, M., Ullrich, D. & Zimmermann, D.(Hrsg.), Tagungsband UP09, S. 220–225.
- [209] Schrepp, Martin; Hinderks, Andreas; Thomaschewski, Jörg (2017): Design and Evaluation of a Short Version of the User Experience Questionnaire (UEQ-S). In: International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence 4, S. 103–108. DOI: 10.9781/ijimai.2017.09.001.
- [210] Knorr, Petra; Schramm, Karen (2012): Datenerhebung durch Lautes Denken und Lautes Erinnern in der fremdsprachendidaktischen Empirie. In: Doff, Sabine (Hrsg.): Fremdsprachenunterricht empirisch erforschen. Grundlagen – Methoden – Anwendung, S. 184–201.
- [211] Völzke, Katja (2012): Lautes Denken bei kompetenzorientierten Diagnoseaufgaben zur naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung: Kassel Univ. Press.Kassel. ISBN: 978-3-89958-585-8.
- [212] Pranoto, Hady; Tho, Cuk; Warnars, Harco Leslie Hendric Spits; Abdurachman, Edi; Gaol, Ford Lumban; Soewito, Benfano (2017): Usability testing method in augmented reality application. In: 2017 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech), S. 181–186. DOI: 10.1109/ICIMTech.2017.8273534.
- [213] Funk, Markus; Kosch, Thomas; Schmidt, Albrecht (2016): Interactive worker assistance: comparing the effects of in-situ projection, head-mounted displays, tablet, and paper instructions. In: Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, S. 934–939. DOI: 10.1145/2971648.2971706.
- [214] Mura, Michela Dalle; Dini, Gino; Failli, Franco (2016): An Integrated Environment Based on Augmented Reality and Sensing Device for Manual Assembly Workstations. In: Procedia CIRP 41, S. 340–345. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.128.
- [215] Renkl, Alexander; Atkinson, Robert; Maier, Uwe H.; Staley, Richard (2002): From example study to problem solving: Smooth transitions help learning. In: Journal of Experimental Education, S. 293–315.
- [216] Murillo, Paula Useche; Moreno, Robinson Jimenez; Avilés, Oscar (2016): Individual Robotic Arms Manipulator Control Employing Electromyographic Signals Acquired by Myo Armbands. In: International Journal of Applied Engineering Research, S. 11241–11249.

- [217] Herrmann, Roman; Schmidt, Ludger (2017): Natürliche Benutzungsschnittstelle zur Steuerung eines Flugroboters. In: Mensch und Computer 2017- Workshopband, S. 637–640. DOI: 10.18420/muc2017-demo-0360.
- [218] Werrlich, Stefan; Phuc-Anh, Nguyen; Daniel, Austino Davis; Yanez, Carlos Emilio Franco; Lorber, Carolin; Notni, Gunther (2018): Design Recommendations for HMD-based Assembly Training Tasks. In: SmartObjects@CHI, S. 58–68.
- [219] Bardy, B.; Delignières, D.; Lagarde, J.; Mottet, D.; Zelic, G. (2010): An Enactive Approach to Perception-Action and Skill Acquisition in Virtual Reality Environments. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics.
- [220] Grier, Rebecca A. (2016): How High is High? A Meta-Analysis of NASA-TLX Global Workload Scores. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 59, S. 1727–1731. DOI: 10.1177/1541931215591373.
- [221] Werrlich, Stefan; Nguyen, Phuc-Anh; Notni, Gunther (2018): Evaluating the training transfer of Head-Mounted Display based training for assembly tasks. In: Proceedings of the 11th Pervasive Technologies Related to Assistive Environments Conference, S. 297–302. DOI: 10.1145/3197768.3201564.
- [222] Werrlich, Stefan; Ginger, Alexandra; Daniel, Austino; Nguyen, Phuc-Anh; Notni, Gunther (2018): Comparing HMD-based and Paper-based Training. In: Proceedings of the IEEE International Symposium for Mixed and Augmented Reality 2018. DOI: 10.1109/ISMAR.2018.00046.
- [223] Funk, Markus; Kritzler, Mareike; Michahelles, Florian (2017): HoloLens is more than Air Tap: Natural and Intuitive Interaction with Holograms. In: Proceedings of the Seventh International Conference on the Internet of Things. DOI: 10.1145/3131542.3140267.
- [224] Universität Zürich (2018): https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss.html. Zuletzt geprüft am: 10.01.2019.
- [225] Mankins, John C. (2009): Technology readiness assessments. A retrospective. In: Acta Astronautica 65, S. 1216–1223. DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.03.058.
- [226] Büttner, Sebastian; Funk, Markus; Sand, Oliver; Röcker, Carsten (2016): Using Head-Mounted Displays and In-Situ Projection for Assistive Systems. In: Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, S. 1–8. DOI: 10.1145/2910674.2910679.
- [227] Lee, Lik-Hang; Hui, Pan (2018): Interaction Methods for Smart Glasses: A Survey. In: IEEE Access 6, S. 28712–28732. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2831081.
- [228] Theis, Sabine; Pfendler, Claudius; Alexander, Thomas (2016): Head-Mounted Displays – Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes. Physische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).Dortmund. ISBN: 978-3-88261-162-5.
- [229] Wille, Matthias (2016): Head-Mounted Displays - Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes. Psychische Beanspruchung beim Einsatz von HMDs: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA).Dortmund. ISBN: 978-3-88261-163-2.
- [230] Gorecky, Dominic; Worgan, Simon F.; Meixner, Gerrit (2011): COGNITO: a cognitive assistance and training system for manual tasks in industry. In: Proceedings of the 29th Annual European Conference on Cognitive Ergonomics, S. 53–56. DOI: 10.1145/2074712.2074723.

Anhang

Demografische Daten

Daten zur Person

Dieser Fragebogen ist anonym und wird nicht Ihrer Person zugeordnet, die Angaben werden für die Auswertung benötigt.

Alter _____ Geschlecht ☐ männlich ☐ weiblich

Position bei BMW _____

Erfahrung mit Augmented Reality

keine Erfahrung ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ viel Erfahrung

Erfahrung mit Montage

keine Erfahrung ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ viel Erfahrung

System Usability Scale (SUS)

System Usability Scale - Fragen

Bitte kreuzen Sie an wie sehr sie der Aussage zustimmen.

Ich denke, dass ich das System regelmäßig nutzen würde.

Stimme gar nicht zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme voll zu

Ich fand das System unnötig komplex.

Stimme gar nicht zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme voll zu

Ich denke das System war leicht zu benutzen.

Stimme gar nicht zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme voll zu

Ich denke, ich würde die Unterstützung einer fachkundigen Person benötigen, um das System benutzen zu können.

Stimme gar nicht zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme voll zu

Ich fand die verschiedenen Funktionen des Systems waren gut integriert.

Stimme gar nicht zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme voll zu

Ich halte das System für zu inkonsistent¹.

Stimme gar nicht zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme voll zu

Ich glaube, dass die meisten Menschen sehr schnell lernen würden, mit dem System umzugehen.

Stimme gar nicht zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme voll zu

Ich fand das System sehr umständlich zu benutzen.

Stimme gar nicht zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme voll zu

Ich fühlte mich bei der Benutzung des Systems sehr sicher.

Stimme gar nicht zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme voll zu

Ich musste viele Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.

Stimme gar nicht zu ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ Stimme voll zu

Generell würde ich die Benutzerfreundlichkeit des Systems folgendermaßen einstufen.

☐ Schlecht ☐ Mangelhaft ☐ Ok ☐ Gut ☐ Exzellent

¹keine durchgehende Logik

NASA-Task Load Index (NASA-TLX)

NASA-TLX - Fragen

Kreuzen Sie auf den Strichen an, wie sie das Training empfunden haben.

Beispiel:



Geistige Anforderungen

Wie viel geistige Anstrengung war bei der Informationsaufnahme und -verarbeitung erforderlich (z.B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen...)? War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erforderte sie hohe Genauigkeit oder war sie fehlertolerant?



Körperliche Anforderungen

Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich (z.B. Ziehen, Drücken, Drehen, Steuern, Aktivieren,...)? War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholsamer mühselig?



Zeitliche Anforderungen

Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt, mit dem Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten? War die Abfolge langsam und geruhig oder schnell und hektisch?



Leistung

Wie erfolgreich haben Sie Ihrer Meinung nach die Ziele erreicht? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Verfolgung dieser Ziele?



Anstrengung

Wie hart mussten sie arbeiten, um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?



Frustration

Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert (versus sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst) fühlten Sie sich während der Aufgabe?



User Experience Questionnaire (UEQ)

UEQ - Fragen

Wie war das Training mit der Applikation für Sie? Bitte ordnen Sie ein.

Ich fand das Training...

behindernd	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	unterstützend
kompliziert	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	einfach
ineffizient	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	effizient
verwirrend	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	übersichtlich
langweilig	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	spannend
uninteressant	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	interessant
konventionell	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	originell
herkömmlich	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	neuartig

DAKKS-Fragebogen

DAKKS - Fragen

Kreuzen Sie an und begründen Sie ihre Antwort kurz in den Zeilen unter der Frage.

- 1) Enthält das Programm alle für Ihre Aufgabe benötigten Funktionen?

ja	nein
----	------

- 2) Müssen Sie Eingaben oder Dialogschritte machen die eigentlich überflüssig wären?

ja	nein
----	------

- 3) Haben Sie das Gefühl, dass Sie Arbeiten machen müssen, die besser das Programm erledigen sollte?

ja	nein
----	------

- 4) Finden Sie in dem Programm Hilfetexte, die Ihnen auch tatsächlich weiterhelfen?

ja	nein
----	------

- 5) Müssen Sie Werte oder Texte eingeben, die der Computer eigentlich wissen könnte?

ja	nein
----	------

Selbstbeschreibungsfähigkeit

- 6) Sind die Informationen, die zur Erledigung der Aufgabe notwendig sind, auf dem Bildschirm übersichtlich verfügbar?

ja	nein
----	------

- 7) Können Sie bei der Arbeit mit dem Programm erkennen, welche Eingabe als nächstes von Ihnen erwartet wird?

ja	nein
----	------

Erwartungskonformität

8) Sind die Meldungen des Systems für Sie immer verständlich?

ja	nein
----	------

9) Müssen Sie oft Kollegen konsultieren, um weiterarbeiten zu können?

ja	nein
----	------

Steuerbarkeit

10) Macht das Programm manchmal etwas, ohne das Sie es zu dem Zeitpunkt wollen?

ja	nein
----	------

11) Können Sie einen Arbeitsschritt wieder zurücknehmen, wenn es für Ihre Aufgabenerledigung zweckmäßig ist?

ja	nein
----	------

12) Fühlen Sie sich in Ihrem Arbeitstempo durch das Programm manchmal gebremst z.B. durch zu lange Wartezeiten?

ja	nein
----	------

13) Finden Sie die Menüpunkte oder Funktionen dort, wo Sie Ihrer Meinung nach auch sein sollten?

ja	nein
----	------

14) Sind Sie manchmal überrascht, wie das Programm auf Ihre Eingabe reagiert?

ja	nein
----	------

Fehlertoleranz

15) Arbeitet das Programm während der Ausführung Ihrer Aufgabe immer stabil und zuverlässig?

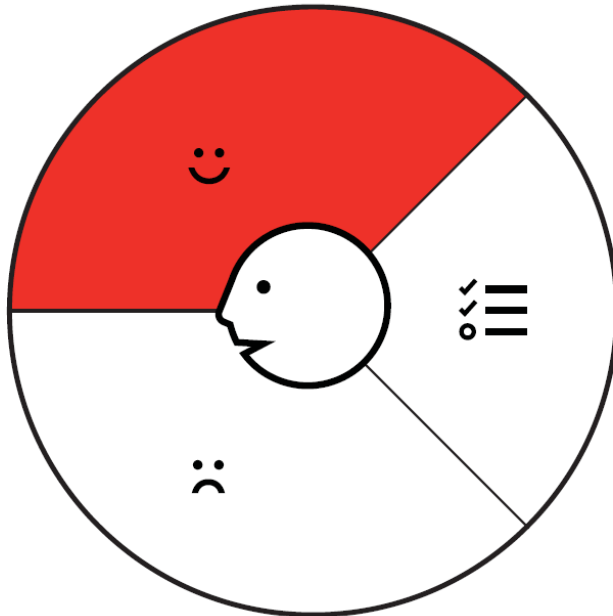
ja	nein
----	------

Lernförderlichkeit

16) Ermöglicht Ihnen das Programm, auch einmal etwas gefahrlos auszuprobieren?

ja	nein
----	------

Trigger-Fragen (Value Proposition Design)



The following list of trigger questions can help you think of different potential customer gains:

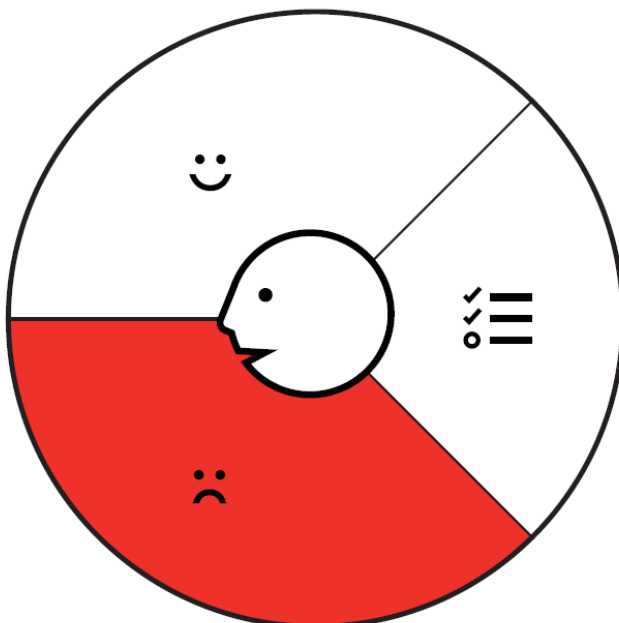
- Which savings would make your customers happy? Which savings in terms of time, money, and effort would they value?
- What quality levels do they expect, and what would they wish for more or less of?
- How do current value propositions delight your customers? Which specific features do they enjoy? What performance and quality do they expect?
- What would make your customers' jobs or lives easier? Could there be a flatter learning curve, more services, or lower costs of ownership?
- What positive social consequences do your customers desire? What makes them look good? What increases their power or their status?
- What are customers looking for most? Are they searching for good design, guarantees, specific or more features?
- What do customers dream about? What do they aspire to achieve, or what would be a big relief to them?
- How do your customers measure success and failure? How do they gauge performance or cost?
- What would increase your customers' likelihood of adopting a value proposition? Do they desire lower cost, less investment, lower risk, or better quality?



17

STRATEGYZER.COM / VPD / CANVAS / 1.1

[Download trigger questions](#)



The following list of trigger questions can help you think of different potential customer pains:

- How do your customers define too costly? Takes a lot of time, costs too much money, or requires substantial efforts?
- What makes your customers feel bad? What are their frustrations, annoyances, or things that give them a headache?
- How are current value propositions underperforming for your customers? Which features are they missing? Are there performance issues that annoy them or malfunctions they cite?
- What are the main difficulties and challenges your customers encounter? Do they understand how things work, have difficulties getting certain things done, or resist particular jobs for specific reasons?
- What negative social consequences do your customers encounter or fear? Are they afraid of a loss of face, power, trust, or status?
- What risks do your customers fear? Are they afraid of financial, social, or technical risks, or are they asking themselves what could go wrong?
- What's keeping your customers awake at night? What are their big issues, concerns, and worries?
- What common mistakes do your customers make? Are they using a solution the wrong way?
- What barriers are keeping your customers from adopting a value proposition? Are there upfront investment costs, a steep learning curve, or other obstacles preventing adoption?



15

STRATEGYZER.COM / VPD / CANVAS / 1.1

[Download trigger questions](#)

Teilstrukturierter Interviewleitfaden (HMD-basierte Trainingssoftware)

- Vorbereitung: Microsoft HoloLens einrichten, Trainingsanwendung starten, Level Auswahl (Beginner) → Interview erfolgt am Beispiel des achten Schritts.
- Zielsetzung erläutern: Benutzer testen und bewerten die verschiedenen Funktionalitäten der Software.

Embly

(Hello Embly sagen und Begrüßungsanimation ansehen)

Wie findest du Embly?

(Embly begleitet dich durch das Programm...)

Wie findest du das Konzept?

Audio

Was passiert wenn du das Feature aktivierst?

Wie findest du das?

Wann würdest du die Funktionalität nutzen? Als Beginner oder Experte? Warum?

Welche Optimierungspotentiale siehst du hier?

3D-statisch

Was passiert, wenn du das Feature aktivierst?

Wie findest du das?

(Bitten näher ran zu gehen – Was passiert jetzt? Wie findest du das?

(Bauteil in die Hand geben)– Könntest du das jetzt montieren oder hast du Schwierigkeiten? Wenn ja, warum?

Welche Optimierungspotentiale siehst du hier?

3D-dynamisch

(Auf Animation umschalten)

Welchen Unterschied siehst du zu 3D-statisch?

Wie findest du das?

Welche Funktionalitäten würdest du lieber für die Montage nutzen und warum?

Welche Optimierungspotentiale siehst du hier?

Text

Was passiert, wenn du die Funktionalität aktivierst?

Wie findest du das?

Kannst du die Schrift gut erkennen oder hast du Probleme etwas zu lesen?

Wann würdest du die Funktionalität nutzen? Als Beginner oder Experte? Warum?

Welche Optimierungspotentiale siehst du hier?

Tunnel

(Embly bekommt einen Stromschlag und verliert an Leben)

Wie findest du diesen spielerischen Lernansatz?

Würden dich die Blitze motivieren, mit den anderen Funktionalitäten auszukommen?
(Jetzt siehst du den Tunnel)

Wie findest du das?

Wie gefällt dir das Feedback?

Wann würdest du die Funktionalität nutzen? Als Beginner oder Experte? Warum?

Welche Optimierungspotentiale siehst du hier?

Video

Was passiert, wenn du das Feature aktivierst?

Wie findest du das?

Wann würdest du die Funktionalität nutzen? Als Beginner oder Experte? Warum?

Welche Optimierungspotentiale siehst du hier?

Zusammenfassung/Allg. Fragen

Enthält die Applikation alle Informationen, die du für die Montage benötigst?

Wie findest du diesen multimodalen Lernansatz?

Ist alles übersichtlich dargestellt?

Ist es leicht zu verstehen?

Würdest du Hilfe für die Montage benötigen oder genügt die Brille mit der Trainingsanwendung?

Welche Funktionalität gefällt dir am besten? Warum?

Interaktion/Steuerung

(Du kannst die App mit Sprache und Gesten steuern... ausprobieren lassen)

Welche Interaktion bevorzugst du, um die App zu steuern? Warum?

Hast du Probleme mit der Interaktion oder siehst du Optimierungsbedarf?

Übersichtsdarstellung

(Klicken auf BMW Ikone)

Wie findest du das?

Backwardfading Fragen

(Wechseln auf Schritt 15– Kannst du dich noch erinnern? Ansatz erläutern)

Wie findest du diesen Ansatz?

Würde dieser Ansatz dir helfen, die Montage zu erlernen? Warum?

Zusätzliches Level

(in die Übersicht zurückgehen und Level starten– Aufforderung korrekte Teile zu selektieren)

Was passiert, wenn du diese Funktionalität aktivierst?

Wie findest du das?

Wie findest du das Feedback und die Animation der Bauteile?

Wie findest du es, dass die Anwendung neu startet, wenn du etwas Falsches auswählst?

Glaubst du, dass dieses Level dir helfen würde, die Reihenfolge zu erlernen? Warum?

Welche Optimierungspotentiale siehst du hier?

Abschluss

Was findest du besonders gut, praktisch, hilfreich?

Was findest du besonders schlecht, unpraktisch, störend?

Welche Optimierungspotentiale siehst du?

Hast du noch irgendwelche Anmerkungen?

Teilstrukturierter Interviewleitfaden (Papieranleitung)

Enthalten die Papieranleitungen alle notwendigen Informationen?

Sind die Informationen übersichtlich dargestellt?

Sind die Informationen leicht zu verstehen?

Würdest du Hilfe für die Montage benötigen oder genügen die Papieranleitungen?

Was findest du besonders gut, praktisch, hilfreich?

Was findest du besonders schlecht, unpraktisch, störend?

Welche Optimierungspotentiale siehst du?

Hast du noch irgendwelche Anmerkungen?

Teilstrukturierter Interviewleitfaden (Trainer)

Standen genügend Informationen während des Trainings zur Verfügung?

Waren die Informationen übersichtlich und leicht verständlich dargestellt?

Würdest du weitere Hilfsmittel für die Montage benötigen oder genügt der Trainer incl. der Dokumente (SAB)?

Was findest du besonders gut, praktisch, hilfreich?

Was findest du besonders schlecht, unpraktisch, störend?

Welche Optimierungspotentiale siehst du?

Hast du noch irgendwelche Anmerkungen?

Veröffentlichungen und Vorträge

19.10.2018 DEU, München		Werrlich, Stefan; Ginger, Alexandra; Daniel, Austino; Nguyen, Phuc-Anh; Notni, Gunther (2018): Comparing HMD-based and Paper-based Training. In: Proceedings of the IEEE International Symposium for Mixed and Augmented Reality 2018, S. 134–142. DOI: 10.1109/ISMAR.2018.00046.
17.07.2018 USA, Las Vegas		Werrlich, Stefan; Lorber, Carolin; Nguyen, Phuc-Anh; Yanez, Carlos Emilio Franco; Notni, Gunther (2018): Assembly Training: Comparing the Effects of Head-Mounted Displays and Face-to-Face Training. In: Chen J., Fragomeni G. (eds) Virtual, Augmented and Mixed Reality: Interaction, Navigation, Visualization, Embodiment, and Simulation, S. 462–476. DOI: 10.1007/978-3-319-91581-4_35.
28.06.2018 GRC, Korfu		Werrlich, Stefan; Nguyen, Phuc-Anh; Notni, Gunther (2018): Evaluating the training transfer of Head-Mounted Display based training for assembly tasks. In: Proceedings of the 11th Pervasive Technologies Related to Assistive Environments Conference, S. 297–302. DOI: 10.1145/3197768.3201564.
23.04.2018 CAN, Montreal		Werrlich, Stefan; Phuc-Anh, Nguyen; Daniel, Austino Davis; Yanez, Carlos Emilio Franco; Lorber, Carolin; Notni, Gunther (2018): Design Recommendations for HMD-based Assembly Training Tasks. In: SmartObjects@CHI, S. 58–68.
07.12.2017 DEU, Berlin		Vortrag zum Thema „Human-Computer Interaction and Augmented Reality Training at BMW“. Panel Presentation Session BUS43 at OEB 2018.
18.10.2017 FRA, Paris		Werrlich, Stefan; Eichstetter, Elisabeth; Nitsche, Kai; Notni, Gunther (2017): An Overview of Evaluations Using Augmented Reality for Assembly Training Tasks. In: International Journal of Computer and Information Engineering, S. 1129–1134.
06.07.2017 DEU, München		Vortrag zum Thema „Head-Mounted Display unterstütztes Anlernen in der Montage“. 3. VDI Fachkonferenz: Augmented und Virtual Reality als Smart-Assistance.
23.06.2017 GRC, Rhodos		Werrlich, Stefan; Nitsche, Kai; Notni, Gunther (2017): Demand Analysis for an Augmented Reality based Assembly Training. In: Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, S. 416–422. DOI: 10.1145/3056540.3076190.
02.06.2017 USA, Santa Clara		Vortrag zum Thema „AR at BMW- Assessing People, Technology and Business“. Augmented Reality World Expo (AWE).
07.03.2017 DEU, Heidelberg		Vortrag zum Thema „Montagetraining mit Augmented Reality“. VR/AR Symposium
19.10.2016 AUT, Graz		Werrlich, Stefan (2016): Augmented Reality for Engine Assembly Workstations: A Human-centered Design. In: Proceedings of the Human Computer Interaction Perspectives on Industry 4.0 at the 16th International Conference on Knowledge Technologies and Data-driven Business (i-KNOW 2016).
Legende  - wissenschaftliche Veröffentlichung  - wissenschaftlicher Vortrag		

Erklärung gemäß Anlage 1 der Promotionsordnung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise ~~entgeltlich~~/unentgeltlich geholfen:

1. Die Herren Phuc-Anh Nguyen, Austino Davis Daniel & Carlos Emilio Franco Yañez haben im Rahmen ihres sechsmonatigen Praktikums, welches sie bei der BMW AG in München absolviert haben, bei folgenden Aufgaben/Tätigkeiten unterstützt: Vorbereitung (z.B. Akquise von Versuchsteilnehmern) und Durchführung (z.B. protokollieren von Montagefehlern) der verschiedenen Versuche, Gestaltung grafischer 2D und 3D Elemente sowie beim Softwaredesign.
2. Frau Alexandra Ginger hat im Rahmen ihres sechsmonatigen Praktikums, welches sie bei der BMW AG in München absolvierte, bei den zahlreichen Versuchsvorbereitungen, Durchführungen sowie bei der Transkription & Analyse der qualitativen Daten unterstützt.
3. Frau Roswitha Welikis hat die Arbeit Korrektur gelesen und Vorschläge zur Verbesserung der Grammatik (z.B. Kommasetzung) unterbreitet.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin darauf hingewiesen worden, dass die Unrichtigkeit der vorstehenden Erklärung als Täuschungsversuch bewertet wird und gemäß § 7 Abs. 10 der Promotionsordnung den Abbruch des Promotionsverfahrens zur Folge hat.

München, 01.03.2019

(Ort, Datum)

(Unterschrift)